

И. Р. Геккер В. И. Юрьев

Субмиллиметровые волны

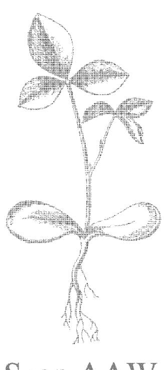
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 412

И. Р. ГЕККЕР, В. И. ЮРЬЕВ

СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

Брошюра знакомит радиолюбителей с вопросами генерирования, распространения и приема субмиллиметровых волн.

В настоящее время субмиллиметровый диапазон сравнительно мало освоен. Однако он представляет существенный интерес для развития радиотехники и других областей науки.

Брошюра рассчитана на читателей, имеющих элементарные знания по физике и технике сверхвысоких частот.

6Ф2. *Геккер Иван Романович*
Г 730. и *Юрьев Валентин Иванович*
СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ВОЛНЫ
64 с. с илл.
М. — Л., Госэнергоиздат
(Массовая радиобиблиотека, вып. 412)
6Ф2.

Редактор *В. И. Вознесенский* Техн. редактор *К. П. Воронич*

Сдано в набор 6/III 1961 г. Подписано к печати 7/VI 1961 г.
Т-07515 Бумага 84×108$^{1}/_{32}$ 3,28 печ. л. Уч.-изд. л. 3,4
Тираж 25 000 экз. Цена 14 коп Заказ 121

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Субмиллиметровыми волнами называются электромагнитные колебания с длиной волны λ от 0,1 до 1 *мм*, т. е. с частотой от 3 000 до 300 *Ггц* (1 *Ггц*$=10^3$ *Мгц*$=10^9$ *гц*). В области низких частот субмиллиметровые волны граничат с миллиметровыми волнами, а в области высоких — с инфракрасными (тепловыми) лучами. Субмиллиметровые волны иногда также называют промежуточными, переходными, гектомикронными или ультрамикроволнами.

Впервые миллиметровые волны ($\lambda=6$—3 *мм*) были получены в 1895 г. при искровом возбуждении миниатюрных вибраторов (диполей) известным русским ученым П. Н. Лебедевым. Позднее в 1923 г. Никольсом и Тиром также с помощью искровых генераторов были получены колебания с $\lambda=2$—4 *мм*. С другой стороны, длинноволновое инфракрасное излучение с λ от 0,2 до 0,34 *мм* было получено в 1911 г. от ртутной кварцевой лампы физиком Рубенсом. Однако длительное время существовал разрыв между радиоволнами и инфракрасным излучением. Только благодаря блестящим работам советского физика А. А. Глаголевой-Аркадьевой в 1922—1924 гг., связанным с созданием массового излучателя, удалось перекрыть весь неизвестный ранее диапазон и получить электромагнитные колебания с длинами волн от 50 до 0,082 *мм*. Вопросам применения субмиллиметровых волн в радиотехнике были посвящены работы советского радиофизика С. Я. Турлыгина.

В настоящее время после успешного технического освоения метровых, дециметровых, сантиметровых и частично миллиметровых волн, а также инфракрасных излучений появляется все больший и больший интерес к субмиллиметровым волнам. Однако исследования

в значительной степени сдерживаются из-за отсутствия в этом диапазоне монохроматических (одночастотных) источников колебаний с мощностью, достаточной для практических целей.

Интерес к субмиллиметровым волнам проявляется как в связи с возможностью получения огромной полосы частот для радиосвязи, так и создания антенн умеренных размеров, дающих остронаправленные пучки электромагнитной энергии. Сильное поглощение в земной атмосфере является существенным недостатком субмиллиметровых волн. Однако это не препятствует их использованию в космическом пространстве для направленной радиосвязи, радиоастрономии и радиолокации, что в связи с успешными запусками советских космических ракет уже не является задачей далекого будущего.

Значительный интерес субмиллиметровые волны представляют для спектроскопии, позволяющей увеличить наши познания о строении различных веществ, для исследования явления сверхпроводимости, для измерения плотности газоразрядной плазмы с высокой концентрацией при осуществлении управляемых термоядерных реакций, для возможного управления ядерными реакторами, для биологии, химии и т. п.

В данной брошюре в основном рассматривается ряд возможных путей создания генераторов субмиллиметрового диапазона, в значительной степени представляющих собой идеи, в лучшем случае опробованные только в миллиметровом диапазоне. В настоящее время трудно предсказать, какой из путей окажется наиболее перспективным. В этом отношении можно сделать только предположительные прогнозы. В брошюре также рассматриваются вопросы, связанные с распространением и приемом субмиллиметровых волн и областями их возможного практического применения.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Задача генерирования электромагнитных колебаний с длиной волны λ от 0,1 до 1 *мм* остается практически нерешенной. Из всего спектра электромагнитных волн, исключая жесткое космическое излучение, только диапазон субмиллиметровых волн до сих пор практически не освоен. Делается много попыток продвижения приборов миллиметрового диапазона в субмиллиметровый. Однако независимо от принципа работы существующих электронных приборов (клистроны, магнетроны, лампы бегущей волны, лампы обратной волны и т. п.) всем им присущи следующие недостатки, выявляющиеся с уменьшением длины волны: 1) резко уменьшаются размеры и допуски на высокочастотные системы; 2) растут высокочастотные потери; 3) падает связь электронов пучка с полем электромагнитной волны, распространяющейся по высокочастотной системе; 4) требуется значительное увеличение плотности тока в пучке; 5) возрастают трудности пропускания плотных электронных пучков в высокочастотных системах; 6) снижается коэффициент полезного действия.

Работа электронных приборов сверхвысокочастотного, в частности миллиметрового, диапазона основана на взаимодействии электронов с электромагнитным высокочастотным полем. Взаимодействие электронов и высокочастотных полей происходит в непосредственной близости от высокочастотных систем, с которыми связана электромагнитная энергия. По мере укорочения длины волны клистроны, магнетроны и другие генераторы становятся трудными в изготовлении. Так, например, для обычного режима работы размеры резонатора должны быть порядка генерируемой длины волны λ. Размеры

тороидального резонатора отражательного клистрона, генерирующего на волне 5,5 *мм*, составляют: диаметр 2,1 *мм*, высота 1,25 *мм*, зазор в месте прохождения электронного пучка 0,2 *мм*.[1] Создать такой резонатор, скажем, на $\lambda = 0{,}5$ *мм*, т. е. с размерами, уменьшенными в 10 раз, при соблюдении соответствующих допусков представляется малореальным.

Так же трудно создать необходимую плотность тока в пучке. С увеличением частоты уменьшается связь электронного пучка с высокочастотным полем в системе, так как напряженность продольного электрического поля экспоненциально спадает при удалении от ее поверхности. Поэтому плотность тока приходится значительно увеличивать (обратно пропорционально $\lambda^{5/2}$). Последнее ограничивается допустимой плотностью эмиссии с катода и возможностями фокусировки электронного пучка.

Несмотря на все указанные трудности, в настоящее время созданы электронные приборы, успешно работающие в длинноволновой части миллиметрового диапазона. Некоторые из приборов продвинулись и далее, в коротковолновую часть этого диапазона. Так, например, за рубежом выпускаются отражательные клистроны с выходной мощностью до сотни милливатт на $\lambda = 4$ *мм*. Разработан двухрезонаторный клистрон 8-миллиметрового диапазона с выходной мощностью до 30 *вт* в непрерывном режиме. Импульсные магнетроны на $\lambda = 6$—8 *мм* имеют мощность до сотен киловатт, а на $\lambda = 3$ *мм* до десятков киловатт. Известно о создании магнетрона на $\lambda = 2{,}6$ *мм* с мощностью до 3 *квт*. Созданы лампы с обратной волной на $\lambda = 6$ *мм* с выходной мощностью в десятки милливатт и на $\lambda = 1{,}5$ *мм* с мощностью менее 1 *мвт*. Известна лампа с бегущей волной на $\lambda = 5$—6 *мм* с выходной мощностью до 0,5 *вт*.

Считается принципиально возможным достижение с помощью магнетронов, ламп с обратной волной и отражательных клистронов (при заметном снижении уровня выходной мощности и срока службы) длин волн порядка 1 *мм*. Однако получение субмиллиметровых волн с помощью подобных приборов представляется практически трудно осуществимым.

---

[1] См. «Зарубежная радиоэлектроника», 1961, № 1, стр. 24—50.

Некоторый успех в продвижении электронных приборов в субмиллиметровый диапазон, как будет показано далее, может быть обеспечен переходом к высоким напряжениям и скоростям электронов, близким к скорости света. Это облегчает фокусировку пучков, снижая расталкивание электронов из-за сил пространственного заряда. Кроме того, становится возможным использование взаимодействия пучков с более быстрыми волнами, т. е. с волнами, скорость которых приближается к скорости света. Последнее облегчает изготовление волноведущих систем, позволяя увеличить их размеры.

2. ПОЛУЧЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Прежде чем рассматривать различные методы генерирования субмиллиметровых волн, остановимся на принципиальном вопросе, имеющем значение для всех рассматриваемых далее источников электромагнитных колебаний, а именно: на вопросе когерентности излучения.

В простейшем случае при сложении двух колебаний $(N=2)$

$$\left.\begin{array}{l} S_1 = a_1 \sin(\omega t + \varphi_1), \\ S_2 = a_2 \sin(\omega t + \varphi_2), \end{array}\right\} \qquad (1)$$

происходящих по одному направлению, получаем вновь колебание того же периода:

$$S = S_1 + S_2 = A \sin(\omega t + \theta), \qquad (2)$$

где A, a_1 и a_2 — амплитуды; θ, φ_1 и φ_2 — фазы отдельных колебаний; ω — угловая частота и t — время.

Амплитуда результирующего колебания A может быть определена из соотношения

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \qquad (3)$$

Из выражения (3) следует, что квадрат амплитуды результирующего колебания, который пропорционален мощности, зависит от разности фаз $(\varphi_1 - \varphi_2)$ исходных колебаний.

Если разность фаз колебаний беспорядочно меняется и многократно пробегает все значения от 0 до 2π за период основного колебания частоты ω, то из выражения (3) при вычислении средней мощности результирую-

щего колебания за некоторый промежуток времени имеем (третий член справа обращается в нуль):

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2$$

или при

$$a_1 = a_2$$

$$A^2 = 2a_1^2 .$$

Таким образом, в данном случае мощность результирующего колебания оказывается пропорциональной сумме мощностей исходных колебаний, сами же колебания будут называться некогерентными. При наличии большого числа источников колебаний N имеем мощность результирующего колебания, пропорциональную Na^2, т. е. N.

Если разность фаз колебаний ($\varphi_1 - \varphi_2$) сохраняется неизменной, то в зависимости от разности фаз мощность результирующего колебания может быть как больше, так и меньше суммы мощностей исходных колебаний. В этом случае колебания называются когерентными.

В оптимальном случае, когда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0,$$

$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 = (a_1 + a_2)^2$$

или при $a_1 = a_2$

$$A^2 = 2^2 a_1^2 .$$

Далее, при числе колебаний N, большем двух, имеем мощность результирующего колебания, пропорциональную N^2a^2, т. е. N^2.

Излучения элементарных источников, таких, как отдельные атомы, молекулы, заряженные частицы (каким образом они излучают, объясняется далее), являются в общем случае примерами некогерентного излучения. Действительно, эти источники излучают независимо друг от друга электромагнитные колебания, отличающиеся как по частоте, так и по фазе. Мощность таких излучений пропорциональна числу источников N и весьма мала по величине. Характерными источниками некогерентного излучения являются все нагретые тела, ртутно-кварцевая лампа, массовый излучатель и т. п.

Для получения значительных мощностей излучения

необходимо, чтобы колебания, исходящие от всех излучающих элементарных источников, имели одинаковую частоту, одинаковое направление электрического и магнитного векторов и одинаковые фазы, т. е. необходимо, чтобы источники колебаний были когерентными. В указанном случае мощность колебаний может быть пропорциональна N^2. Для обеспечения одинаковой фазы колебаний элементарных источников необходимо, чтобы их размеры и расстояния между ними были много меньше излучаемой длины волны.

В сверхвысокочастотных электронных приборах, таких, как магнетроны, клистроны и т. п., источниками электромагнитного излучения служат электроны, взаимодействующие с электромагнитными системами. Эффективная работа этих приборов связана с группированием электронов в плотные сгустки, по размерам меньшие генерируемой длины волны и следующие друг за другом с определенной частотой, равной или кратной частоте генерируемых колебаний. Мощности электромагнитных колебаний, получаемые от электронных приборов сантиметрового и миллиметрового диапазонов, как известно, весьма значительны.

Создание плотных сгустков, меньших длины волны, с уменьшением длины волны генерируемых колебаний резко усложняется из-за увеличения сил, расталкивающих электроны. Последние связаны с наличием сильного электрического поля отрицательного пространственного заряда, создаваемого электронами, образующими сгусток.

Таким образом, для успешной работы различных электронных генераторов субмиллиметрового диапазона, например основанных на использовании эффекта Черенкова, эффекта Допплера и т. п., необходимо создание коротких сгустков электронов с длиной, составляющей доли от длины волны, т. е. десятые миллиметра.

В этом случае мощность излучения будет максимальной и пропорциональной N^2, где N — число электронов в сгустке, или, что то же, квадрату силы тока. Расчеты показывают, что при условии полной когерентности можно ожидать мощность излучения в десятки киловатт. В то же время в случае некогерентности мощность не превышает единиц милливатт, т. е. в десятки миллионов раз меньше.

Сравнительно длинные электронные сгустки, создаваемые, например, приборами сантиметрового диапазона, как это имело место в ряде экспериментов по созданию электронных умножителей частоты, не позволяют получить значительные мощности в субмиллиметровом диапазоне. При наличии сгустков, бо́льших или много бо́льших излучаемой длины волны, отдельные участки сгустков излучают колебания, имеющие разные, хотя и постоянные, фазы. Сложение колебаний, получаемых от различных участков сгустка, приводит в значительной степени к их взаимной компенсации и тем самым к резкому снижению суммарной излучаемой мощности. Мощность излучения в этом случае уже пропорциональна kN^2, так как в создании излучения эффективно участвует только небольшая часть электронов, образующих сгусток, что учитывается коэффициентом k, много меньшим единицы.

Сверхвысокочастотные приборы являются монохроматическими источниками электромагнитных колебаний, вся мощность излучения которых сосредоточена практически на одной частоте. В субмиллиметровом диапазоне в настоящее время единственным источником маломощных монохроматических колебаний является кристаллический умножитель частоты. Выделение мощности излучения в узком участке непрерывного спектра некогерентных источников колебаний с помощью полосовых фильтров является лишь некоторым приближением к получению монохроматического излучения. Кроме того, получаемые таким образом мощности излучения крайне малы.

Создание источников электромагнитных колебаний в субмиллиметровом диапазоне идет как со стороны изобретения принципиально новых методов, так и со стороны совершенствования способов, используемых для генерирования миллиметровых и инфракрасных излучений. С последних и начнем наше рассмотрение.

3. ИЗЛУЧЕНИЕ НАГРЕТОГО ТЕЛА

Одним из возможных путей получения субмиллиметровых волн является использование хорошо известных методов генерирования длинноволнового инфракрасного излучения. Инфракрасное излучение возникает вследст-

вие вращательных или колебательных движений молекул. Движение же молекул связано с нагреванием тел. Таким образом, все тела, как правило, являются источниками теплового или инфракрасного излучения. Однако мощность излучения в длинноволновой части инфракрасного диапазона весьма мала и тем более резко спа-

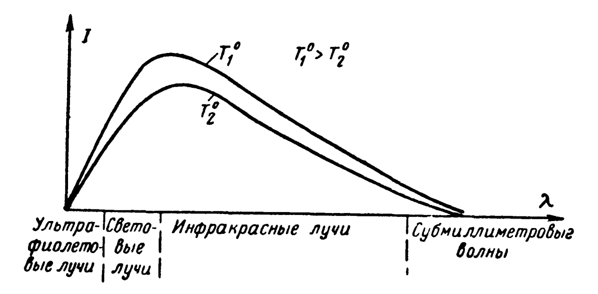


Рис. 1. Спектры излучения нагретого тела.
λ — длина волны, I — интенсивность излучения в относительных единицах, $T°$ — температура тела. Максимум обычно находится в диапазоне λ от 0,1 до 10 *мк*.

дает в субмиллиметровом диапазоне (рис. 1). Так, например, мощность, излучаемая телом, нагретым до 10 000° К, в диапазоне λ от 1 до 0,75 *мм* оценивается в 10^{-8} *вт*. Таким образом, очевидно, что использование нагретых тел как генераторов субмиллиметрового излучения нецелесообразно.

4. РТУТНАЯ КВАРЦЕВАЯ ЛАМПА

Ртутная кварцевая лампа сверхвысокого давления в настоящее время является практически единственным и наиболее удобным источником излучения в широком диапазоне длин волн от 0,1 до 1,6 *мм* с суммарной мощностью излучения до милливатт. Давление внутри лампы составляет несколько десятков атмосфер, а температура в разрядном промежутке — несколько тысяч градусов.

Спектр излучения, возбуждаемого при разряде в парах ртути, и его зависимость от напряжения, плотности тока, давления пара, размеров баллона лампы и т. д. неоднократно подвергались исследованиям. Однако до сих пор нет единой точки зрения на природу этого излучения. С одной стороны, оно объясняется как прояв-

ление колебательно-вращательных переходов в возбужденных молекулах ртути, с другой — торможением электронов в поле положительных ионов.

5. МАССОВЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Массовый излучатель А. А. Глаголевой-Аркадьевой, созданный в 1922 г. (рис. 2), состоит из сосуда *1*, содержащего смесь металлических (латунных или алюминиевых) опилок и вязкого диэлектрика, например машинного или трансформаторного масла. Смесь непре-

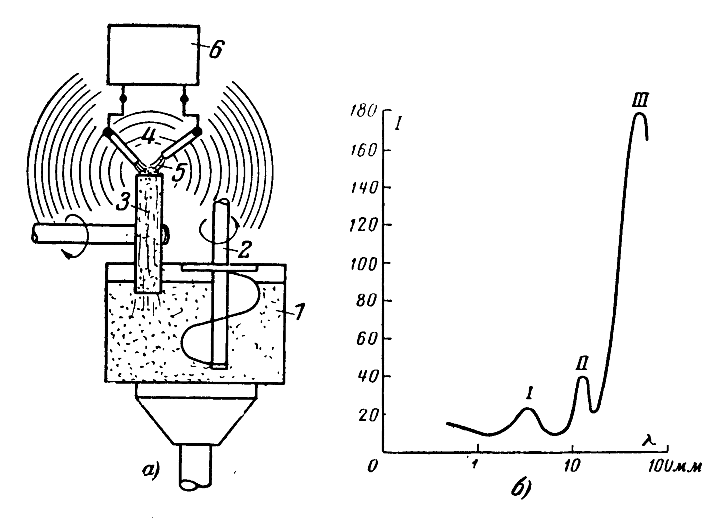


Рис. 2. Массовый излучатель Глаголевой-Аркадьевой.

а — схематическое изображение; *1* — сосуд со смесью металлических опилок и масла; *2* — мешалка, *3* — карболитовое колесико; *4* — электроды; *5* — излучающая часть; *6* — источник высокого напряжения — индуктор; *б* — спектр излучения, измеренный с помощью резонансных термоэлементов; λ — собственные длины волн резонансных термоэлементов; *I* — интенсивность излучения в относительных единицах.

рывно перемешивается с помощью мешалки *2*. На горизонтальной оси вращается карболитовое колесико *3*, которое во время своего движения захватывает смесь, образующую на нем жидкую шину. Через эту смесь на некотором участке *5* шины, являющемся излучающим, пропускаются искры от индуктора *6*. Искры возбуждают в опилках электрические колебания, обладающие значительной энергией.

Принцип работы массового излучателя можно объяснить следующим образом. Металлические опилки, образующие смесь, разделены зазорами, заполненными диэлектриком. Образуемые при этом емкости заряжаются при подаче напряжения от индуктора *6* до начала возникновения искрового пробоя. При возникновении пробоя в зазорах между опилками протекает ток, с которым связано магнитное поле. Таким образом, каждой паре опилок можно приписать определенную емкость и индуктивность и рассматривать ее как элементарный колебательный контур. Поскольку значения емкости и индуктивности весьма малы, то возможно получение колебаний с длинами волн, соответствующими субмиллиметровому диапазону.

Далее, поскольку размеры опилок и зазоры между ними сравнимы с излучаемой длиной волны, возникает излучение электромагнитной волны во внешнее пространство. Колебаниям, излучаемым подобными отдельными элементарными излучателями, возбуждаемыми при искровых пробоях, свойствен из-за наличия потерь затухающий характер. Вся совокупность опилок, имеющих различные размеры, попадающих на излучающий участок *5*, будет генерировать колебания с различными длинами волн и случайными фазами. Поэтому массовый излучатель является источником некогерентных электромагнитных колебаний.

В массовом излучателе возможно получение излучения не только от отдельных пар опилок, но и одновременно от целых совокупностей — цепочек опилок. Во втором случае получается, естественно, более длинноволновое излучение.

Измеренный спектр излучения массового излучателя, простирающийся от $\lambda=50$ *мм* до $\lambda=0{,}082$ *мм*, имеет три максимума (рис. 2,*б*). Максимум *I* на коротких волнах соответствует колебаниям отдельных зерен. Максимум *II* на средних волнах соответствует колебаниям частиц попарно. Наибольший пик *III* соответствует колебаниям цепочек частиц, длина которых зависит от пути искрового разряда в массе.

Наличие максимумов в спектре указывает на возможность некоторой монохроматизации самого источника излучения. Последнее принципиально невозможно для таких источников, как вольтова дуга, ртутно-квар-

цевая лампа и т. п. Однако мощность излучения массового излучателя, приходящаяся на отдельные узкие участки спектра, все же крайне мала. Кроме того, излучателю свойственны колебания уровня излучаемой мощности. Поэтому массовый излучатель используется только при научных исследованиях. В одном из последних образцов массового излучателя была получена мощность до 300 *мвт* в диапазоне λ от 3 до 6 *мм*.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

6. ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ЧАСТОТЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМИ ПРИБОРАМИ

Как уже говорилось выше, в электронных приборах сверхвысокочастотного диапазона, как-то магнетронах, клистронах, лампах с обратной волной, лампах с бегущей волной и т. п., осуществляется группировка электронов в периодическую последовательность сгустков. Переменный во времени электрический заряд возбуждает электромагнитное поле, энергию которого с помощью высокочастотных систем можно отбирать от потока и использовать. Сгруппированный электронный поток содержит как основную частоту, так и высшие гармоники тока, которые могут быть использованы для генерирования более коротких волн.

Процесс группирования может быть более наглядно пояснен с помощью рис. 3 на примере пролетного клистрона. Во входной резонатор *2* клистрона из электронной пушки *1* поступает ускоренный, не сгруппированный электронный поток. В зазоре резонатора происходит модуляция электронов по скорости в переменном электрическом поле, возбуждаемом на основной частоте f. Выходящие из резонатора электроны, имеющие различные скорости, движутся далее в пролетной трубе *4*, где отсутствует поле. При этом электроны, летящие с большей скоростью, будут постепенно нагонять электроны, ранее вылетевшие с меньшей скоростью. В результате этого непрерывный поток электронов будет разбиваться на отдельные сгустки *5*. На рис. 3,*б* показано группирование в разных сечениях электронного потока.

Как показывает анализ, чем сильнее сгруппирован электронный поток, тем больше в нем содержится высших гармоник тока. Амплитуды гармоник падают с увеличением их номера. При оптимальной группировке, т. е. при условиях, когда амплитуда первой основной гармоники составляет 1,16 I_0, где I_0 — постоянная составляющая тока пучка, амплитуда второй — 0,98 I_0, третьей — 0,86 I_0, пятой — 0,76 I_0, десятой — 0,62 I_0, двадцатой —

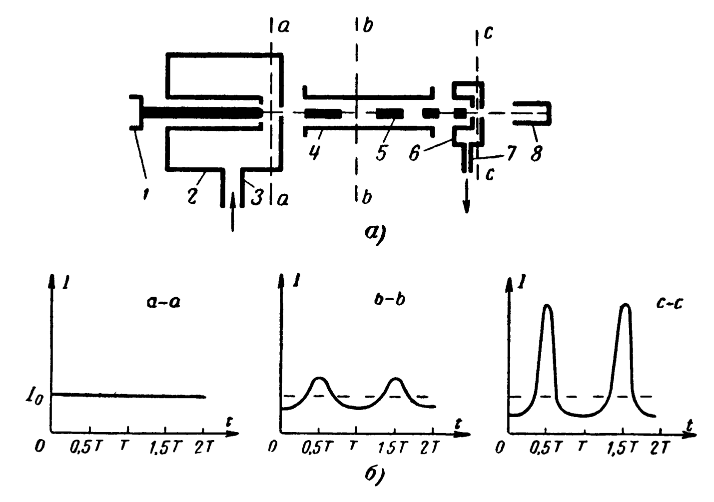


Рис. 3. Пролетный клистрон — умножитель частоты.

а — схема пролетного клистрона — умножителя частоты; *1* — электронная пушка, *2* — входной резонатор; *3* — вход высокой частоты *f*; *4* — пролетная труба; *5* — сгруппированный электронный пучок; *6* — выходной резонатор; *7* — выход высокой частоты *nf*; *8* — коллектор; *б* — зависимости тока *I* от времени (*T* — период основной частоты) в различных сечениях электронного пучка.

0,51 I_0 и т. д. Влияние пространственного заряда, расталкивающего электроны в сгустке, приводит к более резкому падению амплитуд гармоник тока с номером гармоники. Периодическая последовательность сгустков возбуждает электромагнитные колебания в выходном резонаторе *6* пролетного клистрона. Резонатор может быть настроен как на основную частоту, так и на ее высшие гармоники. Двухрезонаторные клистроны могут давать умножение частоты вплоть до 20-кратного в дециметровом и сантиметровом диапазонах при к. п. д., составляющем доли процента. Имеются сведения о по-

лучении таким способом мощности в несколько микроватт на 24-й гармонике ($\lambda=1,7$ *мм*) от клистрона с $\lambda=4,08$ *см*. Это один из способов умножения частоты.

В рассматриваемых далее электронных умножителях частоты также можно различать два основных узла: устройство, группирующее электроны, и выходную систему, под которой будем понимать систему для отбора высокочастотной энергии от сгруппированного потока. Примером группирующих устройств могут служить линейный ускоритель, резонатор и т. п. Сгруппированный электронный поток поступает в ту или иную выходную систему. В ней происходит отбор высокочастотной мощности на соответствующей гармонике частоты модуляции электронного пучка. Выходными системами могут служить различные резонансные и нерезонансные системы, которые будут подробно описаны ниже.

Мощность, генерируемая на n-й гармонике, может быть определена следующим образом:

$$P_n = i_n^2 R_{rn},$$

где i_n — амплитуда n-й гармоники тока пучка на входе в «излучатель», зависящая от степени группирования пучка;

R_{rn} — сопротивление излучения, т. е. сопротивление, в котором как бы происходит выделение мощности при протекании гармоники тока i_n. Оно определяется параметрами «выходной системы», размерами электронного пучка и энергией электронов.

В связи с тем, что сгруппированные электронные пучки, используемые в обычных сверхвысокочастотных приборах, могут содержать высшие гармоники тока, в спектре излучений этих приборов содержатся наряду с основной частотой высшие гармоники. Поскольку электромагнитные системы подобных приборов специально не приспособлены для генерирования высших гармоник, мощность последних будет малой по сравнению с мощностью, излучаемой на основной частоте. Действительно, исследование содержания высших гармоник в излучении магнетрона показало, что если импульсная мощность магнетрона на основной волне $\lambda=1,25$ *см* составляет 20 *квт*, то на третьей гармонике ($\lambda=4,17$ *мм*) — 0,24 *вт*, на восьмой ($\lambda=1,56$ *мм*) —

0,18 *мвт* и, наконец, на десятой ($\lambda=1,25$ *мм*) — в лучшем случае 0,12 *мвт*.

Были сделаны попытки создать приборы с относительно повышенным содержанием гармоник в генерируемом излучении. Один из магнетронов на основной длине волны ($\lambda=3,39$ *см*) генерировал 12 *квт*, на расчетной второй гармонике — до 34 *квт* и на третьей — около 1,2 *квт*.

Таким образом, для генерирования миллиметровых и субмиллиметровых волн с помощью умножения частоты необходимы, с одной стороны, устройства, дающие хорошо сгруппированные сгустки электронов, содержащие высшие гармоники тока, и, с другой стороны, достаточно эффективные «выходные системы» с высоким сопротивлением излучения R_{rn}.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Автоэлектронная или холодная эмиссия (выход электронов с холодной поверхности, например, металла) возникает при создании у поверхности эмиттера, обычно острой иглы, электрических полей с огромной напряженностью, доходящей до 10^7 *в/см*. Успехи в области создания автоэлектронных эмиттеров, достигнутые за последние годы, позволили использовать холодные катоды в ряде приборов. Особенностью холодных катодов является очень крутая вольт-амперная характеристика *1* (рис. 4,*а*), т. е. зависимость электронного тока эмиттера от приложенного напряжения.

Одна из возможных схем использования автоэлектронных эмиттеров для умножения частоты приведена на рис. 4,*б*. Резонатор *1* настроен на основную частоту. Высокочастотное напряжение U_1 суммируется с постоянным напряжением U_0. В течение короткой доли периода Δt основной частоты *3* (рис. 4,*а*) возникает сильный электронный ток с острия *4* (рис. 4,*б*). В результате получаются требуемые короткие импульсы тока, содержащие гармоники основной частоты. В качестве устройства для отбора высокочастотной энергии может быть использован как резонатор *6* (в данном случае), так и другие системы. Так был создан экспериментальный

прибор с входной мощностью в 3 *квт* на $\lambda=3$ *см* и током 20 *ма*, дающий на 4-й гармонике максимальную мощность 60 *мквт*. Сама возможность получения с холодных катодов чрезвычайно тонких электронных пучков диа-

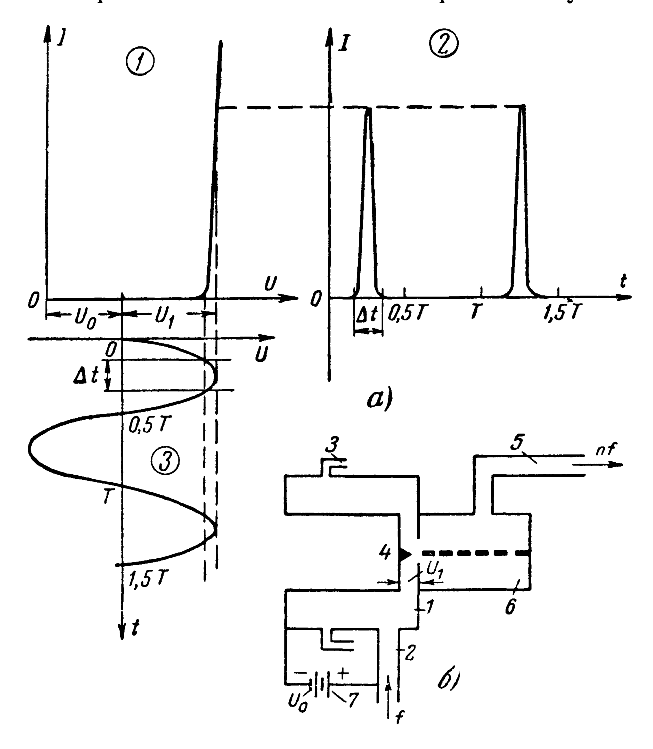


Рис. 4. Умножитель частоты с использованием автоэлектронной эмиссии.

а — формы напряжения и тока; *1* — вольт-амперная характеристика; *2* — получаемые импульсы тока; *3* — высокочастотное напряжение; *T* — период высокочастотного сигнала; *б* — схематическое изображение умножителя частоты: *1* — резонатор; *2* — вход высокой частоты *f*; *3* — высокочастотный дроссельный зазор для изоляции по постоянному напряжению; *4* — автоэлектронный эмиттер — острая игла; *5* — выход высокой частоты *nf*, *n* — номер гармоники; *6* — выходной резонатор; *7* — источник напряжения смещения U_0.

метром до долей микрона и огромных плотностей тока до 10^7—10^8 *а/см*^{2} при общем токе до десятков ампер представляет большой интерес для создания различных генераторов субмиллиметровых волн.

8. РЕБАТРОН, МИКРОТРОН И ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

Рассмотрим еще некоторые устройства, используемые для создания электронных сгустков.

Основными недостатками рассмотренного ранее метода умножения частоты является слабая группировка электронов в сгустки, расползание последних вследствие расталкивания электронов за счет кулоновских сил и наличие резонансных систем, размеры которых резко сокращаются с уменьшением длины волны.

Частично устранить указанные недостатки можно путем использования электронов с скоростями, близкими к скорости света, и энергией до нескольких мегаэлектронвольт (1 *Мэв*=10^6 *эв*). Такие электроны называют релятивистскими, а технику — релятивистской. Релятивистская техника имеет те преимущества, что группировка электронов и их ускорение происходят таким образом, что удается получить более плотные сгустки с минимальной скоростной модуляцией. Для этого используют такие устройства, как ребатрон, микротрон и линейный ускоритель. Высокие ускоряющие напряжения в этих системах облегчают задачу создания больших плотностей тока в сгустке. Системы отбора высокочастотной энергии при релятивистских скоростях электронов могут иметь бóльшие размеры, чем высокочастотные элементы обычных электронных ламп.

Одним из средств для создания плотных ускоренных сгустков электронов является компактный импульсный ускоритель клистронного типа, предложенный Кольманом и названный ребатроном (сокращенно—релятивистский электронный группирующий ускоритель). Схема его приведена на рис. 5. Электроны, выходящие из пушки *1*, поступают с энергией 20 *кэв* в первый объемный резонатор (предгруппирователь) *2*, осуществляющий предварительную группировку электронного пучка. Дальнейшая группировка и ускорение до энергии 1 *Мэв* обеспечиваются с помощью очень сильного высокочастотного поля второго резонатора *4*. Оба резонатора настроены на длину волны около 10 *см*.

Выходящий из подобного ускорителя сильно сгруппированный поток поступает в выходную систему. В данном случае использовался так называемый гармодотрон. В названии выходной системы подчеркивается идея одновременного использования гармоник электронного

пучка и высших типов волн резонатора, возбуждаемых этими гармониками. Гармодотрон представляет собой цилиндрический резонатор *6*, настроенный на высший гип колебаний и вследствие этого имеющий значительные размеры. Сообщалось о получении с помощью такого устройства 34-й гармоники ($\lambda=3,18$ *мм*). Импульсная мощность на 13-й гармонике ($\lambda=8,31$ *мм*) при токе пучка 5 *ма* была порядка 1 *вт*.

Другим устройством для ускорения электронов является микротрон, предложенный в 1944 г. советским

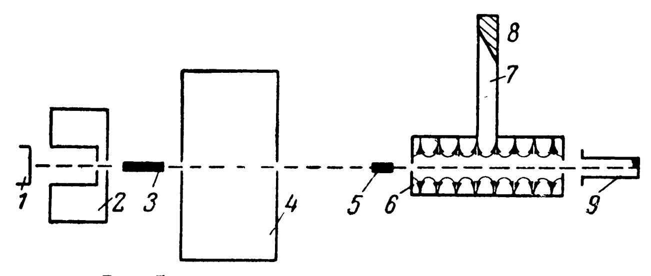


Рис. 5. Схема ребатрона с гармодотроном.

1 — электронная пушка; *2* — резонатор-предгруппирователь, *3* — предварительно сгруппированный электронный пучок; *4* — ускоряющий резонатор (волна типа TM_{010}, $\lambda=10,8$ *см*); *5* — сгруппированный электронный пучок с энергией 1 *Мэв*; *6* — гармодотрон (волна типа TM_{018}, $\lambda=8,31$ *мм*; дана конфигурация электрического поля); *7* — волновод; *8* — согласованная нагрузка; *9* — коллектор

ученым В. И. Векслером. Основными узлами микротрона (рис. 6) являются объемный резонатор *1*, в высокочастотном поле которого происходит ускорение электронов, и постоянный магнит *2*. Последний создает однородное поле, направленное перпендикулярно плоскости рисунка, заставляющее электроны двигаться в вакуумной камере *3* по круговым орбитам. Орбиты имеют одну общую точку касания в зазоре резонатора. В этом зазоре создаются сильные электрические высокочастотные поля с напряженностью до $0,5 \cdot 10^6$ *в/см*, приводящие к возникновению автоэлектронной эмиссии с краев резонатора. Выходящие электроны многократно проходят через зазор. Каждый раз в зазоре электроны дополнительно приобретают энергию за счет высокочастотного ускоряющего поля и движутся по круговым орбитам с периодом, кратным периоду основной частоты. При этом образуются сгустки.

Обычно создаются микротроны на энергии в несколько мегаэлектронвольт, однако возможно создание микротронов и на десятки мегаэлектронвольт. Токи в микротронах сравнительно малы и обычно не превосходят нескольких миллиампер. Питание резонаторов осуществляется как на $\lambda = 10$ *см*, так и $\lambda = 3{,}2$ и 1,25 *см*. При экспериментах по излучению радиоволн пучком от микротрона, проходящим через гармодотрон, была получена мощность 1 *мвт* на λ около 8 *мм*.

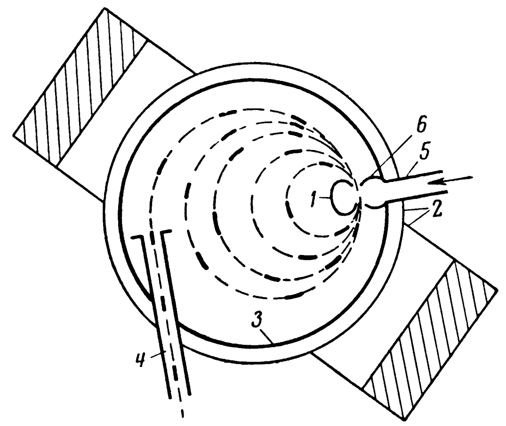


Рис. 6. Схема микротрона.

1 — резонатор; *2* — постоянный магнит; *3* — вакуумная камера; *4* — устройство для выхода сгруппированного ускоренного электронного пучка; *5* — ввод высокочастотной мощности в резонатор; *6* — зазор резонатора.

Основные эксперименты по генерированию миллиметровых и субмиллиметровых волн с помощью релятивистских электронных пучков были проведены на линейных ускорителях. Линейный ускоритель с бегущей волной (рис. 7) состоит из электронной пушки *1* и цилиндрического волновода, нагруженного диафрагмами *2*. В таком волноводе электромагнитная волна движется со скоростью, меньшей скорости света. Закон плавного изменения скорости волны определяется диаметром отверстий в диафрагмах и расстоянием между ними. Ускорение электронов происходит в электрическом поле этой бегущей волны. При этом скорость волны на входе соответствует скорости электронов, попадающих в волновод из электронной пушки с энергией

20—100 *кэв*. Скорость электронов на выходе ускорителя близка к скорости света. Энергия электронов, ускоренных в линейном ускорителе, обычно достигает нескольких мегаэлектронвольт при импульсном токе в десятки и даже сотни миллиампер. Известен линейный ускоритель на энергии до 600 *Мэв*. Работают линейные ускорители обычно на волне 10 *см*, что оказывается наиболее удобным практически. Входная высокочастотная мощность берется от мощных импульсных магнетронов

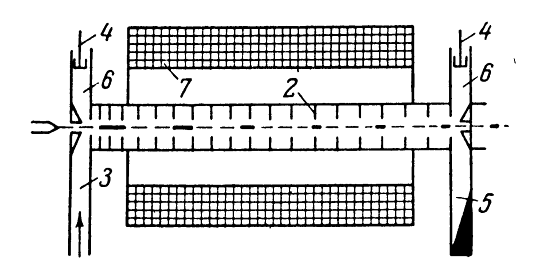


Рис. 7. Схема линейного ускорителя.

1 — электронная пушка; *2* — диафрагмированный волновод; *3* — ввод высокочастотной мощности в волновод; *4* — подстроечные плунжеры; *5* — согласованная нагрузка; *6* — трансформаторы волны типа TE_{10} (в прямоугольном волноводе) в волну типа TM_{01} в круглом диафрагмированном волноводе; *7* — магнитная фокусирующая катушка.

на 1—2 *Мвт* или многорезонаторных пролетных клистронов на 20—30 *Мвт*.

Линейные ускорители обычно формируют сгустки ускоренных электронов, протяженность которых составляет около одной десятой от периода высокочастотных колебаний, питающих ускоритель. Например, для $\lambda = 10$ *см* длина сгустка порядка 10 *мм*. Создание ускорителей, работающих на более коротких длинах волн, а также использование на входе ускорителей группирующих устройств, в частности клистронного типа, в принципе позволит получить более короткие сгустки. При этом величины амплитуд гармоник тока в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах возрастут.

9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАВИЛОВА — ЧЕРЕНКОВА

Теперь перейдем к рассмотрению некоторых возможных излучающих систем.

В 1934 г. советский физик П. А. Черенков экспери-

ментально обнаружил, что чистые жидкости, включая дистиллированную воду, при облучении радиоактивными источниками дают видимое направленное излучение. Тщательные исследования, проведенные им под руководством С. И. Вавилова, показали, что полученное световое излучение нельзя рассматривать как люминесценцию жидкостей.

В 1937 г. обнаруженное явление было теоретически объяснено советскими учеными И. Е. Таммом и И. М. Франком. Физическое объяснение этого явления, носящего название эффекта Вавилова—Черенкова, заключается в следующем.

Если заряженные частицы (в данном случае быстрые электроны, возникающие в жидкости под действием радиоактивного излучения) движутся в среде со скоростью, превышающей фазовую скорость света в этой среде, то собственное электромагнитное поле частиц не поспевает за их движением и отшнуровывается в виде самостоятельно существующего излучения. В этом случае поле излучения имеет структуру так называемой ударной волны и сосредоточено внутри движущегося конуса с вершиной в точке мгновенного местонахождения заряженной частицы. Поэтому «сверхсветовой» электрон называют иногда «светящимся».

Рассмотрим процесс образования излучаемых электроном сферических волн. В том случае, когда скорость распространения электромагнитных колебаний в среде больше скорости движения электрона, сферические волны всегда оказываются внутри друг друга и их сложения не происходит (рис. 8,*а*). В случае же когда скорость распространения электромагнитных волн меньше, чем скорость движения электрона, что возможно в средах с показателем преломления n, бо́льшим единицы, образуется результирующая коническая волна (рис. 8,*б*).

Сказанное выше может быть объяснено с помощью элементарных формул. Путь AB, пройденный электроном за отрезок времени Δt, будет равен:

$$AB = v\Delta t = \beta c \Delta t,$$

где $\beta = \frac{v}{c}$, v — скорость электрона; c — скорость света ($3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*).

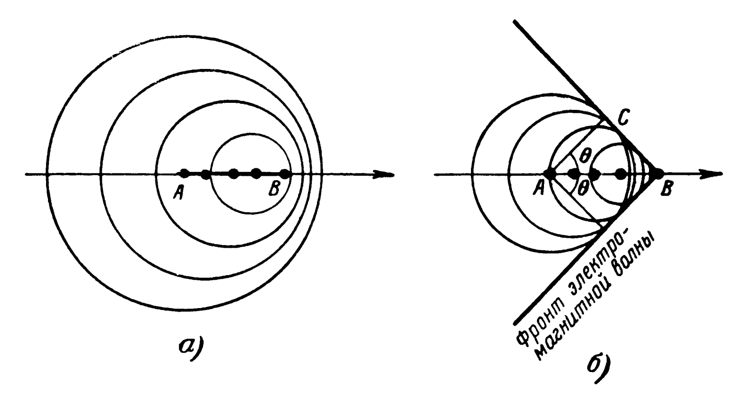


Рис. 8. Картины образования сферических волн, излучаемых отдельными частицами.

а — скорость электрона меньше скорости распространения электромагнитных волн в среде, *б* — скорость электрона больше скорости распространения электромагнитных волн в среде (эффект Черенкова).

Путь AC, пройденный за то же время Δt электромагнитной волной, равен:

$$AC = v_ф \Delta t = \frac{c}{n} \Delta t,$$

где $v_ф = \frac{c}{n}$ — скорость элекромагнитной волны в среде.

Из обеих формул получаем:

$$\cos\Theta = \frac{AC}{AB} = \frac{1}{\beta n},$$

где Θ — угол между направлением движения электрона и перпендикуляром к фронту волны электромагнитного колебания.

Из последней формулы видно, что для сравнительно медленных электронов с $\beta = \frac{1}{n}$ $\cos\Theta = 1$, а $\Theta = 0$, т. е. излучение не имеет места, так как сферические волны будут внутри друг друга (рис. 8,*а*). Это значение β является пороговым для излучения Черенкова в среде с показателем преломления n. По мере увеличения β растет величина угла Θ, в пределах которого наблюдается электромагнитное излучение. Видно также, что излучение имеет направленный характер.

Аналогичные ударные волны возникают при движении в воздухе какого-либо тела (например, снаряда или реактивного самолета) со скоростью, превышающей скорость звука в воздухе.

Катер, движущийся по гладкой поверхности воды, также создает две волны, идущие под углом от его носовой части. При этом чем быстрее движется катер, тем под более острым углом разбегаются волны. Когда скорость движения катера становится меньше скорости движения волн по поверхности воды, носовые волны исчезают.

В 1947 г. советский физик В. Л. Гинзбург предложил использовать эффект Черенкова для генерирования высокочастотных колебаний в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Чтобы получить значительные излучаемые мощности, необходимо использовать короткие сгустки электронов, движущиеся с высокой скоростью, и пропускать их через канал в диэлектрике. При этом длина сгустков и поперечные размеры канала в диэлектрике должны быть по возможности малыми по сравнению с длиной волны возбуждаемого излучения. По расчету эффективные черенковские излучатели могут иметь сопротивление излучения R_{rn} в сотни тысяч ом в миллиметровом диапазоне и несколько тысяч ом в субмиллиметровом диапазоне. Мощность излучения, как следует из формулы § 6, при данной амплитуде гармоники тока тем больше, чем больше сопротивления излучения R_{rn}.

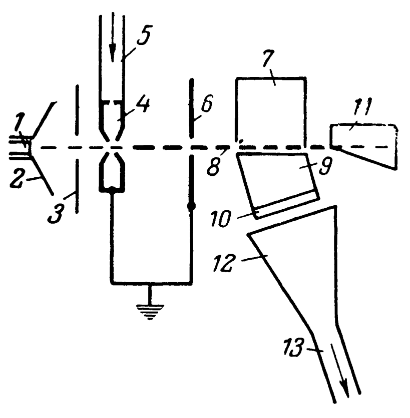


Рис. 9. Схема экспериментальной установки для генерирования излучения Черенкова.

1 — катод; *2* — фокусирующий электрод; *3* — ускоряющий электрод; *4* — группирующий резонатор; *5* — ввод высокочастотной мощности; *6* — электрод; *7* — электрод; *8* — сгруппированный пучок электронов; *9* — диэлектрик (TiO_2), показатель преломления $n = 10$); *10* — четвертьволновая согласующая пластина; *11* — коллектор; *12* — приемный рупор; *13* — вывод излучаемой мощности к приемнику.

Эксперименты по исследованию излучения Черенко-

ва в длинноволновой части миллиметрового диапазона производились в основном в СССР и США. В ряде экспериментов со сравнительно низковольтными электронными сгустками (с энергией порядка 10—20 *кэв*) были получены мощности излучения порядка нескольких микроватт на волнах с $\lambda=10$ *мм*. Дальнейшие исследования излучения Черенкова релятивистскими электронными сгустками показали возможность получения мощностей излучения порядка 10—100 *мвт* в диапазоне $\lambda=$ $=7$—8 *мм* и 1—10 *мквт* на $\lambda\approx2$ *мм* в импульсе. При этом релятивистский сгруппированный электронный пучок пропускался через канал в диэлектрическом цилиндре с $\varepsilon=10$, помещенном в металлический волновод. Электронные сгустки длиною примерно 10—12 *мм* с энергией 2—5 *Мэв* формировались в линейном ускорителе. Ток пучка достигал десятков миллиампер. Получение значительных мощностей черенковского излучения в субмиллиметровом диапазоне, как показывают расчеты, требует значительного улучшения группировки и оптимального выбора параметров излучателей.

10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ДОППЛЕРА — БЕЛОПОЛЬСКОГО

В 1842 г. австрийским физиком Допплером было математически показано, что частота колебаний источника, воспринимаемая наблюдателем, будет зависеть от скорости их относительного движения. В 1900 г. русский астроном А. А. Белопольский впервые исследовал указанный эффект экспериментально. Эффект Допплера—Белопольского имеет место как для акустических, так и для электромагнитных колебаний. Всем известно изменение тона гудка паровоза или сирены пожарной машины, быстро проезжающих мимо наблюдателя. При этом частота звука при приближении к наблюдателю увеличивается, а при удалении от наблюдателя снижается. Эффект проявляется тем сильнее, чем ближе скорость движения к скорости распространения колебаний в среде. Для звуковых колебаний эта скорость соответствует скорости звука, а для электромагнитных — скорости света.

Увеличение частоты с помощью эффекта Допплера—Белопольского может быть практически получено как при наличии движущегося источника электромагнитных

колебаний, так и при наличии движущегося зеркала, отражающего падающее на него излучение от неподвижного источника.

В первом случае источником излучения может служить, например, электрон, имеющий одновременно поступательное движение по направлению к наблюдателю со скоростью, близкой к скорости света, и поперечное колебательное движение (рис. 10). В этом случае колеблющийся электрон подобен движущемуся элементарному диполю. Длина волны колебаний, принимаемая наблюдателем, будет:

$$\lambda_p = \lambda_e (1 - \beta \cos \theta),$$

где $\beta = \frac{v}{c}$; v — скорость движения электрона; c — скорость света; λ_e — длина волны колебаний, генерируемая колеблющимся электроном; θ — угол наблюдения.

Как видно из вышеприведенной формулы, при приближении β к единице можно получить коротковолновое излучение. Например, при $v=0,99\ c$, что соответствует энергии электрона 3 *Мэв*, для $\lambda_e=5$ *см* и $\theta=0$ можно получить желаемое субмиллиметровое излучение с $\lambda_p=$ $=0,5$ *мм*, т. е. укорочение излучаемой длины волны в 100 раз. На возможность использования эффекта Допплера для генерирования коротковолнового излучения также было указано в 1947 г. В. Л. Гинзбургом.

Эксперименты, проведенные Моцем в 1953 г., с устройством, называемым магнитным ондулятором (рис. 10) и предназначенным для использования эффекта Допплера, дали возможность получить в миллиметровом диапазоне суммарную мощность порядка 10—100 *мвт* в импульсе. Магнитный ондулятор представлял собой набор из двух десятков магнитов с периодическим изменением направления магнитного поля, составляющего по величине несколько тысяч эрстед. Сгруппированный электронный пучок, проходивший в вакуумном волноводе, испытывал в подобном магнитном поле движение по траектории, близкой к синусоидальной, представлявшей сложение требуемого поперечного колебательного движения электронов (за счет изменения полярности магнитного поля) с поступательным, близким к скорости света.

Как выяснилось впоследствии, излучение ондулятора

действительно настолько слабо, что вряд ли представляет практический интерес. Однако физические исследования эффекта Допплера на коротких радиоволнах продолжаются.

С помощью магнитного ондулятора при энергии электронов 17 *Мэв* и среднем токе 4 *мка* было получено излучение с суммарной мощностью 10^{-7} *вт*, сосредоточенное в основном в диапазонах $\lambda=0{,}1$—$0{,}25$ *мм* и $\lambda=$

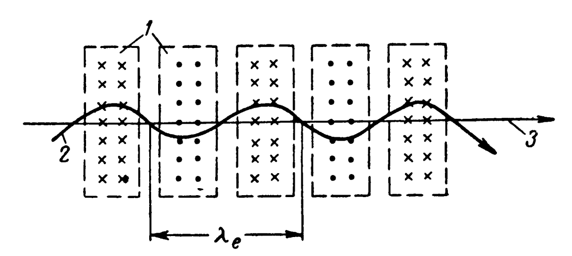


Рис. 10. Схема магнитного ондулятора.

1 — магниты; *2* — траектория сгруппированного пучка ускоренных электронов с пространственным периодом колебания λ_e; *3* — излучение электронов; × — магнитное поле направлено от нас; • — направлено к нам.

$=0{,}05$—$0{,}067$ *мм* (напряженность магнитного поля $H=1\,000$—$1\,500$ *э*).

Незначительные мощности, полученные при использовании электронных пучков с током порядка 1 *ма* в импульсе, выходящих из линейного ускорителя с энергией 3—5 *Мэв*, были связаны с тем, что обычные линейные ускорители, работающие на волне 10 *см*, создают сгустки электронов длиной порядка 10 *мм*. В данном случае длина сгустка много больше, чем требуется для генерирования миллиметровых волн. Наличие столь длинных сгустков не может способствовать когерентному генерированию даже миллиметрового излучения.

Вторым возможным способом реализации эффекта Допплера для генерирования коротковолнового излучения является идея использования движущегося зеркала. При этом имеется следующая зависимость, связывающая падающую длину волны $\lambda_п$ с отраженной $\lambda_о$,

$$\lambda_о=\lambda_п\frac{1-\beta}{1+\beta}.$$

Таким образом, для того чтобы преобразовать, например, мощность, излучаемую на волне $\lambda_п=4$ *мм*, в мощ-

ность на $\lambda_0=1$ *мм*, требуется, чтобы $\beta=0{,}6$. Такое «движущееся зеркало» можно создать из достаточно плотного облака электронов. Однако и в этом случае встречаются большие технические трудности, связанные с тем, что для обеспечения эффективного отражения падающей волны от облака необходимо, чтобы оно было резко очерчено: переходная граничная область электронного облака должна быть мала по сравнению с длиной отражаемой волны.

11. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО И ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Переходное излучение электромагнитных волн возникает при прохождении равномерно движущегося электрона через границу двух сред, имеющих различные диэлектрические проницаемости ε. Частными случаями возникновения излучения являются влет электрона из вакуума в среду с диэлектрической постоянной ε_1 или в металлический проводник ($\varepsilon_2=\infty$).

Физически возникновение переходного излучения объясняется следующим образом. Движущийся электрон обладает электрическим и магнитным полями, которые при влете электрона в металл отражаются от металлической поверхности и самостоятельно распространяются в виде электромагнитной волны. Такое же отражение происходит при прохождении электрона через границу двух диэлектриков при резком изменении диэлектрической проницаемости ε.

Аналогичным образом происходит излучение от сгустков электронов. Мощность переходного излучения в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона на два—три порядка меньше, чем при использовании эффекта Черенкова при релятивистских энергиях.

Тормозное излучение возникает при торможении заряженной частицы, например электрона, в электрическом поле или плотной среде какого-либо диэлектрика. Торможение электрона связано с изменением его скорости, т. е. с наличием ускорения (в данном случае отрицательного). Сопротивление излучения и мощность, излучаемая при торможении, в 2—3 раза меньше, чем при переходном эффекте. Тормозное излучение мощностью 10^{-8} *вт* в миллиметровом диапазоне впервые наблюдалось советским физиком К. И. Крыловым в 1934 г.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

12. КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ

Под «плазмой» понимается совокупность свободных отрицательных и положительных заряженных частиц, содержащихся примерно в равном количестве. Например, плазменная среда образуется в результате разряда между электродами при давлении порядка 10^{-3}—10^{-1} *мм рт. ст.* При этом поток электронов, выходящих с катода *К* (рис. 11), в процессе движения к аноду *А*

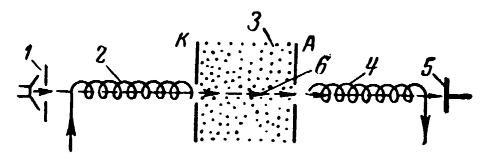


Рис. 11. Схема прибора для усиления электромагнитных колебаний в плазме.

1 — электронная пушка; *2* — модулирующая спираль, на которую подается высокочастотный усиливаемый сигнал; *3* — область плазмы; *4* — спираль съема усиленного высокочастотного сигнала; *5* — коллектор; *6* — электронный поток; *К, А* — катод и анод для создания разряда в области *3*.

ионизирует газ. При ионизации в результате соударений электронов с молекулами газа, содержащегося в колбе, образуются ионы и медленные электроны. Количество заряженных частиц в единице объема зависит от давления и рода газа в колбе, от объемной рекомбинации, от оседания на стенках колбы, на электродах и т. д. В результате образования и ухода заряженных частиц создается определенная равновесная плотность зарядов в единице объема.

Впервые в 1929 г. плазма исследовалась Лэнгмюром и Тонксом. Они установили, что в плазме возникают колебания электронов с частотой

$$f_{\text{п}} = 9 \cdot 10^3 \sqrt{n},$$

где n — число электронов в 1 *см*^{3}; $f_{\text{п}}$ — частота колебаний электронов, *гц*. Например, концентрации $n = 10^{15}$ соответствует $\lambda = 1$ *мм*. Физически колебания в плазме,

по представлению Лэнгмюра и Тонкса, могут быть объяснены перемещениями легкоподвижных электронов относительно решетки, образуемой практически неподвижными положительными ионами. При этом смещение электрона приводит к возникновению возвращающей силы притяжения к иону. В результате электроны испытывают периодические колебания. Наличие колеблющихся зарядов приводит к появлению плазменной электромагнитной волны, у которой напряженность электрического поля направлена вдоль распространения волны.

Таким образом, принципиально возможно получение взаимодействия электронного потока с газоразрядной плазмой, аналогичного взаимодействию электронов пучка в лампе с бегущей волной с высокочастотным полем периодической замедляющей металлической системы.

При этом высокочастотная система в случае плазмы становится объемной и, что существенно, прозрачной для электронов. Для использования колебаний плазмы в качестве источника электромагнитного излучения на весьма высоких частотах нужен эффективный способ возбуждения колебаний электронов. Для этого, как и в лампе с бегущей волной, необходимо ввести электронный поток со скоростью, несколько большей фазовой скорости электромагнитного поля, распространяющегося в плазме. В результате взаимодействия между электронным потоком и плазменной электромагнитной волной образуются сгустки электронов, которые создают электромагнитные колебания. Эти колебания по мере группирования электронов нарастают с расстоянием, проходимым электронным потоком в плазме, до тех пор, пока не вступят в действие ограничивающие факторы.

В настоящее время таким способом получено усиление колебаний в дециметровом и сантиметровом диапазонах волн. Схема прибора для усиления колебаний показана на рис. 11. Электронный поток из пушки *1* проходит через спираль *2*, в которую вводится высокочастотный сигнал, предварительно модулирующий поток. В результате дальнейшего взаимодействия электронного потока с волной в плазме *3* модуляция увеличивается. Поэтому при проходе через спираль *4* снимается усиленный высокочастотный сигнал. Экспериментально получены плазменные усиления 20—30 *дб* вплоть до $\lambda = 3$ *см*.

Основной задачей для продвижения систем с плазмой в субмиллиметровый диапазон для усиления и генерирования электромагнитных колебаний является избавление от металлических структур для ввода и съема сигнала. Последние, как очевидно, совершенно неприемлемы в субмиллиметровом диапазоне.

13. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПЛАЗМЕ

Для получения гармоник основной частоты могут быть использованы вещества, обладающие нелинейными свойствами, т. е. нелинейной зависимостью между входным и выходным сигналом. Такими веществами в принципе могут быть полупроводники, плазма и ферромагнитные материалы.

Теория газового разряда показывает, что ток высокочастотного разряда содержит как основную частоту, так и ее гармоники. Эксперимент, проведенный с разрядом, зажженным между двумя встречными штырями в волноводе на $\lambda = 10$ *см*, показал, что при входной мощности основной частоты 12,4 *квт* вторая гармоника на выходе имеет мощность 60 *мвт*, третья — 21 *мвт* и четвертая 0,6 *мвт*. При мощности 10 *квт* на $\lambda = 3$ *см* было получено около 10 *мвт* на седьмой гармонике ($\lambda = 4$ *мм*). Ожидается, таким образом, получение коротких миллиметровых и субмиллиметровых волн.

14. ГЕНЕРИРОВАНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Как известно, атомы и молекулы обладают строго определенными дискретными значениями внутренней энергии. При этом изменения энергии могут происходить только скачками между допустимыми энергетическими уровнями. В твердых телах, которыми и являются полупроводники, при соединении отдельных атомов в кристаллическую решетку энергетические уровни электронов смещаются под воздействием электрических полей соседних атомов и в совокупности образуют целые энергетические полосы. В полупроводниках энергетические полосы с густо расположенными в них возможными уровнями отделяются друг от друга запрещенными зонами. Кроме того, наличие нарушений строения кристаллической решетки, например из-за наличия по-

сторонних атомов, приводит к возникновению дополнительных дозволенных местных уровней, расположенных в пределах запретной зоны. Таким образом, в полупроводниках имеется большое число энергетических уровней. Переход электронов с более низких энергетических уровней на более высокие связан с поглощением энергии. Обратный переход приводит к излучению. Принципиально возможно подобрать полупроводники с энергетическими переходами, приводящими к излучению электромагнитных волн в субмиллиметровом диапазоне. Так, было экспериментально обнаружено излучение на $\lambda = 8$ *мк* при облучении сурьмянистого индия видимым и ультрафиолетовым светом. Интересны сообщения о возможности генерирования маломощного излучения при лавинных пробоях в кремниевых диодах на частоте 9 000 *Мгц*. Подобная генерация была также получена на частоте 3 000 000 *Мгц* ($\lambda = 0{,}1$ *мм*).

О принципиально возможном получении значительных высокочастотных мощностей с помощью полупроводников говорят эксперименты по генерированию колебаний с помощью использования сложного перехода в кремнии, помещенного в резонатор и находящегося при отрицательном смещении. При этом были получены выходные мощности до 20 *вт* в непрерывном режиме на частоте 5 000 *Мгц*. Также было отмечено получение более коротковолнового излучения вплоть до частот 50 000 *Мгц* ($\lambda = 6$ *мм*).

15. КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ УМНОЖИТЕЛИ ЧАСТОТЫ

Кристаллические умножители частоты обычно используют для генерирования волн короче 5 *мм*. В этих генераторах синусоидальное напряжение основной частоты подается на нелинейный полупроводниковый элемент — кристаллический детектор (рис. 12,*а*).

Ток, протекающий через детектор, содержит как составляющую основной частоты *1*, так и ее высшие гармоники (рис. 12,*б* и *в*). Математически число гармоник может быть бесконечным, однако практически амплитуды гармоник резко падают с увеличением их номера. Если ток (рис. 12,*б*) пропустить через вибратор *4*, то возбудятся электромагнитные колебания как на основной частоте, так и на ее гармониках. Эти гармоники

могут быть выделены из общего спектра частот с помощью резонансного контура или волновода. На рис. 12,*г* приведена одна из возможных конструкций умножителя.

Два волновода расположены один над другим. Волновод *1* имеет размер, необходимый для прохождения

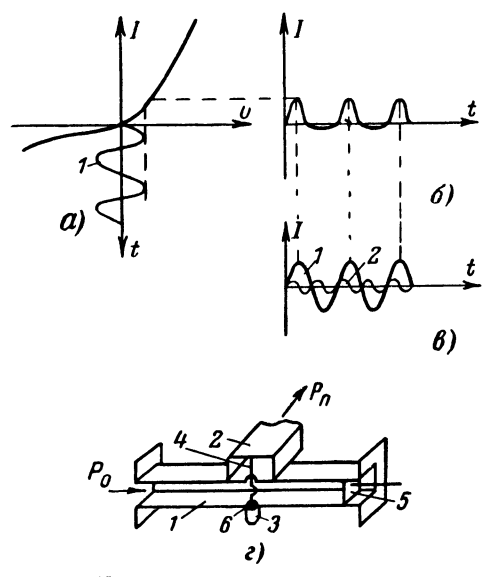


Рис. 12. Кристаллический умножитель частоты.

а — вольт-амперная характеристика кристаллического детектора; *1* — напряжение основной частоты, подаваемое на детектор; *б* — зависимость тока детектора от времени на выходе; *в* — составляющие гармоники тока для рис. *б*; *1* — основная частота; *2* — вторая гармоника основной частоты; *г* — конструкция умножителя частоты: *1* — волновод основной частоты с мощностью P_0; *2* — волновод, отбирающий гармоники основной частоты с мощностью P_n; *3* — держатель кристалла; *4* — вибратор; *5* — подстроечный поршень (поршень волновода *2* на рисунке не показан); *6* — кристаллический детектор.

электромагнитных колебаний основной частоты, подаваемой, например, от отражательного клистрона. Настроечные поршни подстраивают до получения на выходе максимальной мощности. Когда колебания основной частоты f, обычно с мощностью около 100 *мвт*, возбуждают зонд *4* в волноводе *1*, то через детектор *6* и зонд *4* протекают токи основной частоты и гармоники. В волноводе *2* возбуждаются высокочастотные колебания желаемой гармоники, а также гармоники более высокого

порядка. Мощность гармоник по расчёту падает обратно пропорционально квадрату их порядкового номера. Практически мощность на второй гармонике падает примерно на 15 *дб* по сравнению с мощностью на основной, мощность на третьей — на 15 *дб* от второй и т. д.

Кристаллические умножители позволяют создать маломощные стабильные почти монохроматические источники колебаний. При этом, если выделяется n-я гармоника, то $n+1$-я на 15—20 *дб* меньше n-й, более высокие гармоники еще меньше. Полоса перестройки доходит до нескольких тысяч мегагерц и ограничивается только перестройкой основного генератора. Например, если основной генератор, работающий на длине волны около 1 *см*, имеет перестройку 4 000 *Мгц*, то на пятой гармонике можно получить перестройку в полосе 20 000 *Мгц*.

Для умножителей частоты обычно используют германиевые или кремниевые детекторы, имеющие практически одинаковые коэффициенты преобразования. Однако германиевые кристаллы более стабильны. Наладка умножителя достаточно кропотлива. Умножители частоты представляют интерес как маломощные источники колебаний субмиллиметрового диапазона для экспериментальных исследований. В табл. 1 приведены некоторые параметры умножителей, разработанных за рубежом.

Следует еще раз отметить, что кристаллические умножители являются практически единственными источниками монохроматических колебаний в субмилли-

Таблица 1

Параметры кристаллических умножителей частоты

Тип генератора основной частоты	Длина волны генератора, *мм*	Номер гармоники	Длина волны гармоники, *мм*	Потери преобразования, *дб*
Клистрон отражательный	12,5	2	6,25	18
		3	4,17	35
		4	3,12	45
		5	2,50	60
Клистрон отражательный	12,5	2	6,25	10
		5	2,5	32
		15	0,83	65

метровом диапазоне. В настоящее время с их помощью получены маломощные колебания вплоть до $\lambda=0,5$ *мм* (восемнадцатая гармоника).

16. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФЕРРИТАХ

Ферриты или ферромагнитные полупроводники широко используются в технике сверхвысоких частот. Они обладают очень малой электропроводностью при наличии магнитных свойств. Ферриты при определенных условиях могут обладать нелинейными свойствами и могут быть использованы для получения гармоник основной частоты.

Исследования ферритов в режиме насыщения в диапазоне длин волн от 3 *см* до 4 *мм* показали возможность получения удвоения частоты. Так, при подаче импульсной входной мощности 32 *квт* на $\lambda=3$ *см* было получено 8 *квт* на второй гармонике ($\lambda=1,5$ *см*). Эффективность преобразования при этом была равна 25%. Также были зарегистрированы высшие гармоники вплоть до пятой. В других экспериментах на 70 *Ггц* ($\lambda=4,2$ *мм*) была получена выходная импульсная мощность 9 *вт* на 2 *мм*. При этом куски ферритов различной конфигурации помещались в прямоугольный волновод, через который проходили колебания на основной частоте. Волновод помещался в постоянное магнитное поле, направленное нормально к его широким стенкам. Преимуществом ферритов по сравнению с полупроводниками является принципиальное использование объемных явлений, позволяющих получать значительные мощности. Недостаток связан с потребностью в больших магнитных полях.

17. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УСИЛИТЕЛИ

Электромагнитная волна при прохождении через вещество, как правило, испытывает поглощение. Последнее связано с тем, что в обычных условиях количество молекул, способных поглотить электромагнитную энергию, больше, чем число молекул, способных ее излучить, т. е. перейти с более высокого на более низкий энергетический уровень.

Однако еще в 1939 г. советским физиком В. А. Фабрикантом была высказана идея, открывающая возможность перевода вещества в состояние, когда оно сможет не только поглощать энергию электромагнитной волны,

но и отдавать ей часть своей энергии. Для осуществления этого требовалось каким-либо способом устранить частицы, способные поглощать энергию, так чтобы образовался избыток частиц, способных отдать волне часть своей энергии. Первые действующие образцы молекулярных генераторов (мазеров) появились только в 1954 г. Они были созданы независимо Таунсом в США и Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым в СССР.

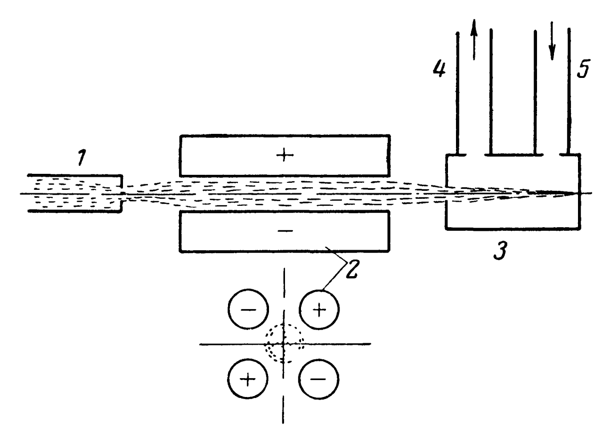


Рис. 13. Молекулярный усилитель.

1 — источник молекул; *2* — конденсатор; *3* — объемный резонатор; *4* — вывод высокочастотной энергии; *5* — ввод высокочастотной энергии.

Схематическое изображение молекулярного генератора представлено на рис. 13. Из источника *1* выходит молекулярный пучок (обычно молекулы аммиака). Пучок проходит вдоль оси электрического конденсатора *2*, состоящего, как правило, из четырех стержней-электродов, подсоединенных через один к положительному и отрицательному полюсам источника высокого напряжения. В поле этого конденсатора и происходит отделение молекул, способных излучать, от молекул, способных поглощать радиоволны. В молекулах аммиака при помещении их в электрическое поле происходит смещение энергетических уровней. При этом по мере увеличения напряженности электрического поля энергия, соответствующая интересующим нас верхним уровням, несколько увеличивается, а нижним — уменьшается. Поскольку любая система стремится прийти в состояние с мини-

мальной потенциальной энергией, то молекулы аммиака, находящиеся в нижнем энергетическом состоянии, стремятся втянуться в область сильных электрических полей, где их энергия уменьшается. Активные же молекулы, находящиеся в верхнем энергетическом состоянии, наоборот, стремятся выйти в область, где отсутствуют поля. В данном квадрупольном электрическом конденсаторе поле убывает по направлению к оси. Поэтому активные молекулы собираются к оси конденсатора, а остальные отклоняются в стороны.

Далее активные молекулы попадают в объемный резонатор *3*, настроенный на частоту спектральной линии молекул (для аммиака $\lambda = 12{,}6$ *мм*). Из сосуда тщательно откачан воздух.

При этом возможны два режима работы прибора: режим усиления и режим генерации. Взаимодействие пучка активных молекул аммиака в резонаторе с вводимой электромагнитной волной на $\lambda = 12{,}6$ *мм* приводит к тому, что молекулы отдают последней избыточную энергию, усиливая тем самым волну. При достаточно большой энергии, вносимой в резонатор пучком активных молекул, возможно скомпенсировать потери энергии в его стенках и энергию, передаваемую в полезную нагрузку. При этом в резонаторе смогут возбудиться электромагнитные колебания.

Молекулярные генераторы отличаются рекордной стабильностью частоты $\Delta f/f = 10^{-10}$, значительно превосходящей стабильность обычных кварцевых генераторов. Однако мощность, получаемая от молекулярных генераторов, крайне мала и обычно не превосходит нескольких единиц на 10^{-10} *вт*. Молекулярные усилители отличаются предельно малыми уровнями шума и могут иметь коэффициент усиления до 10—20 *дб*. В настоящее время в США разрабатывается генератор на $\lambda = 3{,}5$ *мм* с использованием пучка молекул цианистого водорода.

Принципиально возможно также создать молекулярные генераторы и в субмиллиметровом диапазоне, используя переходы между энергетическими уровнями, сравнительно далеко отстоящими друг от друга. Так, имеются проекты генераторов на $\lambda = 0{,}58$ *мм* с использованием переходов между тремя энергетическими уровнями в газообразном натрии и на $\lambda = 0{,}5$ *мм* с применением молекул аммиака,

Другой разновидностью квантово-механических усилителей (генераторов), к которым принадлежат также молекулярные усилители, являются парамагнитные усилители. Принцип их действия основан на использовании квантовых переходов между тремя энергетическими уровнями в кристаллах некоторых парамагнитных веществ.

Так, в усилителе на кристалле искусственного рубина (с примесью 0,05% хрома) переходы с нижнего уровня на верхний производятся подачей мощности накачки 10 *мвт* на $\lambda=1{,}25$ *см*. Усиление сигнала с λ около 3 *см* связано с переходами с верхнего уровня на средний.

Кристалл рубина помещен в резонатор, настроенный одновременно на обе длины волны и находящийся в магнитном поле 4000 *э* при температуре жидкого гелия 4,2° К. Усиление достигает 30 *дб* при малом уровне шума. Последнее позволяет увеличить дальность действия радиолокационной станции до 2 раз за счет снижения входного шума приемника.

Аналогичный усилитель также создан в 8-миллиметровом диапазоне на диэлектрике из двуокиси титана с примесью железа. В этом случае накачка производится на $\lambda=4$ *мм*.

Недавно за рубежом использование кристаллов искусственного рубина позволило создать усилитель оптического диапазона — лазер (это название дано в отличие от мазера, являющегося усилителем сверхвысокочастотного диапазона). Основным узлом этого усилителя является посеребренный со всех сторон кристалл рубина (куб с ребром 2,5 *см*), образующий объемный резонатор с двумя входными отверстиями. Накачка с импульсной мощностью 1 *Мвт* осуществляется от неоно-криптоновой газоразрядной лампы, дающей яркое зеленое свечение.

Выходная мощность усиливаемого красного сигнала составляет 10 *квт* в импульсе, коэффициент усиления равен 4—5, а к. п. д. доходит до 1%.

Подобный источник когерентного излучения считается многообещающим для целей многоканальной и космической связи, локации, вычислительной техники и спектроскопии. Принципиально возможно создание аналогичных усилителей в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

18. ПРОХОЖДЕНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Отсутствие удовлетворительных источников колебаний субмиллиметрового диапазона является одной из основных причин ограниченности экспериментальных данных, касающихся разных областей, в которых мог бы использоваться для исследований данный диапазон радиоволн. Это, в частности, касается и исследований

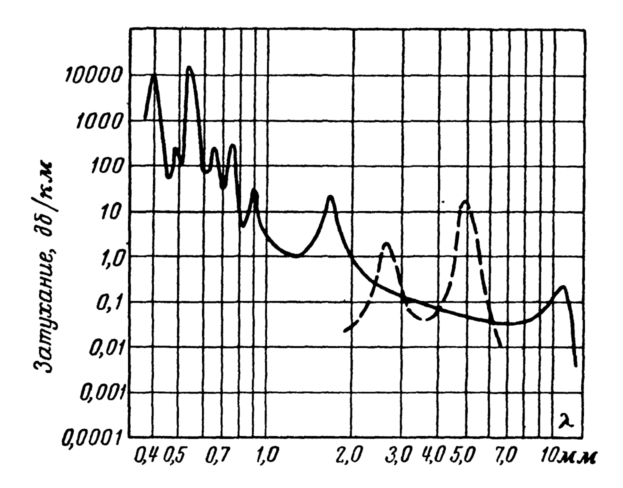


Рис. 14. Зависимость затухания миллиметровых и субмиллиметровых волн от длины волны (сплошная линия — поглощение в парах воды при влажности 8 $г/м^3$ и 20° С, пунктирная — в кислороде при давлении 760 *мм рт. ст.* и 20° С).

поглощения субмиллиметровых волн в различных средах.

Как показывают расчеты и эксперименты, субмиллиметровые волны, так же как и миллиметровые, сильно поглощаются в атмосфере (рис. 14). Однако при этом величина поглощения значительно больше, чем в миллиметровом диапазоне. Потери в основном обусловлены поглощением в парах воды, а для длинноволновой области также и в кислороде. Сильное затухание субмилли-

метровых волн в атмосфере ограничивает их применение для радиолокации и радиосвязи. Однако следует отметить, что поглощение уменьшается по мере увеличения высоты пропорционально падению атмосферного давления и содержанию водяных паров.

Интересны сведения по прохождению субмиллиметровых волн через ряд веществ, таких, как стекло, кварц, парафин, скипидарная сажа и др. Данные по пропусканию в диапазоне длин волн λ от 0,05 до 0,6 *мм* приводятся на рис. 15. Например, пластинка кристаллического кварца толщиной 4—5 *мм* поглощает коротковолновую радиацию, начиная от длины волны $\lambda=5$ *мк* (0,005 *мм*); в длинноволновой области пропускание проходящей через нее электромагнитной волны увеличивается, доходя до 80% при 0,4 *мм*. При толщине 35—40 *мм* кристаллический кварц полностью поглощает радиацию в области от 0,005 до 0,1 *мм* и пропускает 75% при $\lambda=0{,}5$ *мм*. Плавленый кварц пропускает значительно хуже. Пластинка парафина толщиной 1 *мм* сильно поглощает коротковолновое излучение и хорошо пропускает длинноволновое. Толстая пластинка парафина (5—6 *мм*) при $\lambda=0{,}1$ *мм* пропускает 50%, а при 0,6 *мм* — более 75%. Всю видимую и близкую часть инфракрасного спектра полностью поглощает скипидарная сажа. Ее пропускание сильно возрастает в длинноволновой области и в значительной степени зависит от толщины и плотности слоя. Так, слой, получающийся при равномерном нанесении 0,6 *мг* сажи на 1 $см^2$ поверхности пластинки парафина, кварца и полиэтилена, пропускает более 95% радиации с длиной волны 0,25 *мм*, в то время как слой с плотностью 5 $мг/см^2$ пропускает в этой области всего лишь 50%. Черная бумага почти полностью не пропускает излучение с $\lambda<0{,}1$ *мм*. Органические вещества: полиэтилен, полихлорфторэтилен (тефлон), полистирол, поливинилхлорид (винидур) и полиуретан при толщине слоя 1 *мм* и более, сильно поглощая средневолновую инфракрасную радиацию, становятся «прозрачными» для длинноволновой.

Матирование поверхности пластинок с помощью наждачной бумаги приводит к дополнительному снижению прохождения коротковолновой радиации за счет рассеяния. Обычно полиэтилен наряду с кварцем применяется для изготовления окон спектрометров и кювет,

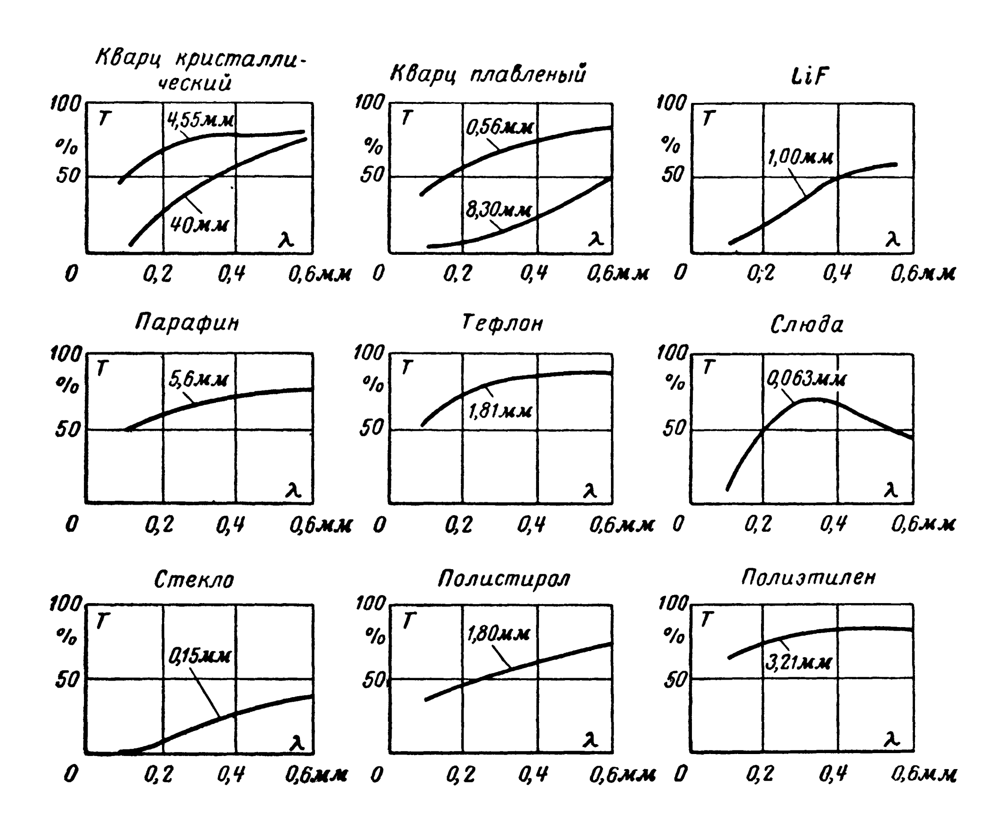


Рис. 15. Спектральное пропускание некоторых материалов в диапазоне λ от 0,1 до 0,6 *мм* (толщина слоев указана на кривых).

а винидур и полиуретан — в качестве фильтров при работе в наиболее длинноволновой области спектра.

Используя различные вещества в качестве фильтров, а также избирательное отражение (отражение волн определенного участка спектра) от кристаллов, дифракционных решеток, матированных поверхностей, можно выделить тот или иной участок спектра субмиллиметрового излучения. Это позволяет в какой-то мере получать колебания в требуемой полосе субмиллиметрового диапазона.

19. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Канализация (передача) электромагнитной энергии в сантиметровом и миллиметровом диапазонах обычно осуществляется с помощью прямоугольных или реже круглых волноводов. Волноводы обладают малыми потерями и не излучают электромагнитную энергию во внешнее пространство. Размеры волноводов выбираются такими, чтобы в требуемом диапазоне частот распространялся только один тип волны, характеризуемый определенной конфигурацией электрических и магнитных силовых линий. Это также создает ряд преимуществ волноводных линий передачи.

Однако если в диапазоне λ от 11 до 7,5 *мм* используется волновод сечением 7,2×3,4 *мм*, то при λ около 0,5 *мм* сечение волновода составит 0,35×0,18 *мм*, т. е. высота волновода будет соответствовать двум-трем диаметрам человеческого волоса. Очевидно, что изготовление подобных волноводов крайне затруднительно. Наряду с этим увеличение частоты приводит к росту затухания из-за потерь на стенках волноводов (рис. 16). Так, например, в серебряном волноводе сечением 0,87× ×0,43 *мм* расчетное затухание в диапазоне λ от 1,45 до 0,9 *мм* составляет от 11 до 18 *дб/м*, т. е. на длине 1 *м* имеет место ослабление в 12—60 раз, что ограничивает его применение. Это обстоятельство заставляет разрабатывать новые средства канализации электромагнитной энергии. Следует отметить, что затухание, связанное с поглощением в воздухе, может быть снижено при создании вакуума внутри волновода.

Представляет интерес использование волноводов с типами волн распространяющихся колебаний, затухание которых падает с увеличением частоты, например

цилиндрического волновода с волной типа $TE_{01}(H_{01})$ (рис. 17). Таким же свойством обладает Н-образный волновод, состоящий из двух проводящих параллельных полос, разделенных диэлектрической пластиной (рис. 16). В других волноведущих системах используются либо поверхностные волны в диэлектриках, помещенных на металлические плоскости, либо диэлектрические трубы или стержни.

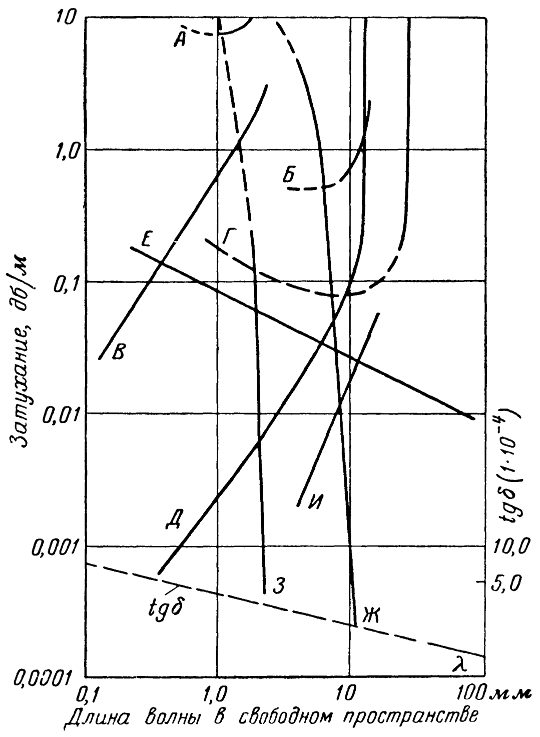


Рис. 16. Зависимость теоретического затухания от длины волны для различных волноводов (медь с удельным сопротивлением $R_s = 2{,}61 \cdot 10^{-7}\sqrt{f}$ [*ом/см²*], полистирол с $\varepsilon = 2{,}54$ и $\operatorname{tg}\delta$ — пунктиром).

А — прямоугольный волновод из меди размерами 4,25×0,55 *мм* для волны типа TE_{10}; *Б* — то же размерами 7,1×3,5 *мм* для волны типа TE_{10}; *В* — круглый волновод из меди диаметром 3 *мм* для волны типа TE_{01}; *Г* — то же диаметром 16 *мм* для волны типа TE_{11}; *Д* — то же диаметром 16 *мм* для волны типа TE_{01}; *Е* — проводник, покрытый диэлектриком (полистрол на меди) диаметром 20 *мм*, слой 0,8 *мм* для волны TM_{01}; *Ж* — диэлектрический волновод (полистрол) диаметром 2 *мм* для волны типа HE_{11}; *З* — диэлектрический трубчатый волновод (полистрол) диаметром 2 *мм* и 1,8 *мм* для волны типа HE_{11}; *И* — волновод из диэлектрика (полистрол), расположенного между двумя параллельными металлическими пластинами (медь) размерами 2,5×12,7 *мм* для волны типа HE_{11}.

Обычно в субмиллиметровом диапазоне используются оптические способы передачи электромагнитной энергии, например плоские и вогнутые полированные металлические зеркала, кварцевые и парафиновые линзы и т. п. В этом случае от передающего до приемного устройства электромагнитная волна движется в сво-

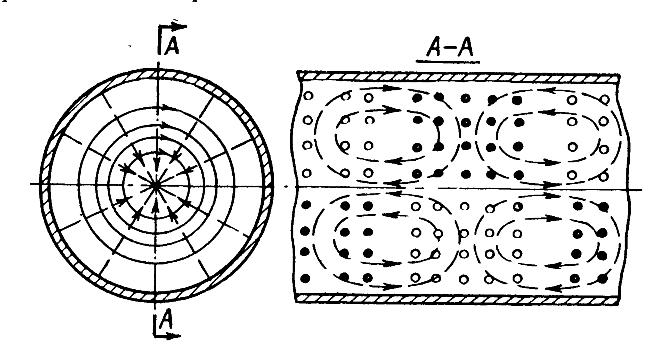


Рис. 17. Конфигурация электрических и магнитных силовых линий волны типа TE_{01} в круглом волноводе.

——→ — силовые электрические линии; — — → — силовые магнитные линии; ● — силовая линия направлена от читателя; ○ — силовая линия направлена к читателю.

бодном пространстве. Зеркала и линзы формируют узкие направленные пучки электромагнитных волн. При этом обеспечивается развязывание от влияния других источников колебаний и уменьшаются потери электромагнитной волны на рассеивание в свободном пространстве. В качестве излучающих и приемных систем могут быть использованы обычные антенны рупорного или рефлекторного типа.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРИЕМ И ИЗМЕРЕНИЯ НА СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛНАХ

20. ИНДИКАЦИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Для обнаружения электромагнитного излучения в субмиллиметровом диапазоне волн могут быть использованы кристаллические детекторы, болометры, радиометры, инфракрасные детекторы типа ячейки Голея и т. п.

Кристаллические кремниевые и германиевые детекторы удовлетворительно работают во всем миллиметровом диапазоне. В ряде экспериментов, например, Моца и Горди, была показана возможность разработки кристаллических детекторов для индикации излучения в субмиллиметровом диапазоне вплоть до $\lambda=0,15$—0,5 *мм*. Схематическое выполнение кристаллического детектора показано на рис. 18,*а*.

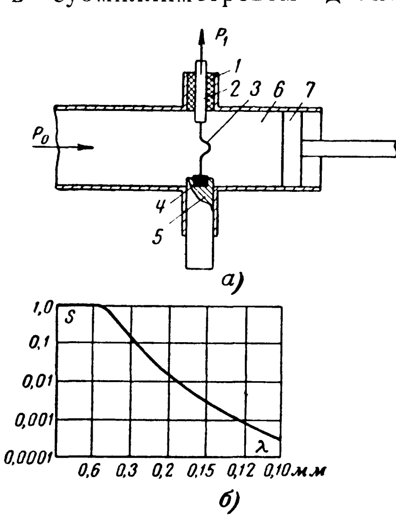


Рис. 18. Кристаллический детектор.
а — схема детекторной головки; *1* — изолятор; *2* — держатель проволочки; *3* — проволочка; *4* — кристалл; *5* — держатель кристалла; *6* — волновод; *7* — подстроечный поршень; P_0, P_1 — входной и продетектированный сигналы; *б* — зависимость чувствительности кристаллического детектора *S*, отнесенная к чувствительности болометра, от длины волны λ.

Вольфрамовая проволочка *3* диаметром порядка десятков микрон имеет заостренный кончик в месте контакта с кристаллом *4*. Для продвижения в субмиллиметровый диапазон необходимо создавать миниатюрные конструкции детекторов и подбирать новые полупроводниковые материалы. Чувствительность (минимальная мощность подаваемого на детектор сигнала, которую можно принять на фоне шумов, создаваемых детектором) кристаллических детекторов по мере укорочения длины волны λ падает. На рис. 18,*б* приведена зависимость чувствительности германиевого кристаллического детектора, отнесенной к чувствительности болометра, от длины волны излучения. Видно, что при λ короче 0,6 *мм* наблюдается резкое падение чувствительности детектора. При измерениях в качестве источника излучения использовалась ртутная лампа, а отдельные линии спектра выделялись с помощью дифракционных решеток типа эшелетты, о которой речь будет идти ниже.

При волнах излучения короче 0,6 *мм*, как следует из рис. 18,*б*, чувствительность болометров выше, чем у кри-

сталлических детекторов. Болометры являются элементами, сопротивление которых изменяется при нагреве индуцируемым излучением. Для увеличения своей чувствительности болометры требуют снижения тепловых потерь, уменьшения нагреваемой массы и увеличения температурного коэффициента сопротивления. Таким образом, имеют преимущества, например, болометры, помещенные в вакуумные баллоны и имеющие более тонкую проволоку и высокое удельное сопротивление. Болометры в субмиллиметровом диапазоне могут иметь чувствительность до $6 \cdot 10^{-11}$ *вт* и постоянную времени порядка 0,1—20 *мсек* (время, за которое происходит нагревание тела болометра и связанное с ним изменение сопротивления).

Для индикации субмиллиметрового сигнала может использоваться также радиометр. Основным элементом радиометра является слюдяная пластинка толщиной в несколько микрон, на половину которой наносится с помощью напыления тончайший слой серебра. Слюдяная пластинка подвешивается к пробке колбы на тонкой кварцевой нити диаметром около 10 *мк*. В сосуде создается разрежение, соответствующее примерно 10^{-2} *мм рт. ст.* Субмиллиметровое излучение поступает через кварцевое окно, создающее меньшие потери при прохождении, чем стекло, и падает на пластинку. Неравномерный нагрев обеих половинок слюдяной пластинки приводит к тому, что создается различное давление молекул газа, ударяющихся в различные половины пластинки, в результате чего пластинка поворачивается вокруг оси. Угол поворота зависит от интенсивности излучения и упругих свойств кварцевой нити, уравновешивающей момент вращения. Поворот индицируется по отклонению светового луча, падающего на маленькое зеркальце, приклеенное к кварцевой нити. Недостатком радиометра является большая постоянная времени, доходящая до нескольких секунд.

Инфракрасный пневматический детектор типа ячейки Голея успешно используется во всем спектре от ультрафиолетового излучения до инфракрасного и далее вплоть до миллиметрового излучения. Схема детектора приведена на рис. 19. Герметичная камера *2*, наполненная газом, имеет с одной стороны тонкую зачерненную пленку *1* толщиной 0,01 *мк*, на которую падает элек-

тромагнитное излучение. Падающее излучение нагревает находящийся в камере газ. Газ расширяется и деформирует гибкое металлическое зеркало *3*, закрывающее другую сторону камеры. При этом происходит изменение прохождения через сетку *8* отраженного светового сигнала *6*, падающего на зеркало *3* от призмы *5* и далее регистрируемого фотоэлементом *7*. Детектор регулируется таким образом, чтобы в отсутствие излучения P_0 сетка *8* не пропускала лучи, отраженные от зеркала *3*.

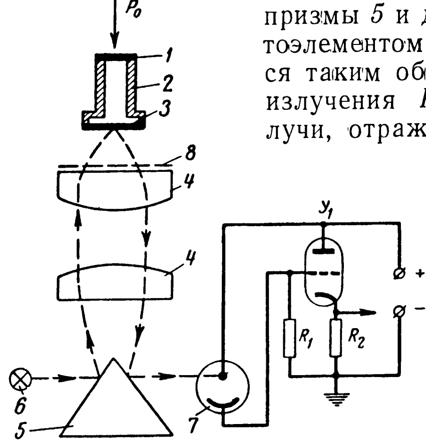


Рис. 19. Схема ячейки Голея.

1 — зачерненная пленка; *2* — стеклянная камера; *3* — гибкое металлическое зеркало; *4* — фокусирующие линзы; *5* — призма; *6* — лампочка; *7* — фотоэлемент; *8* — сетка; $У_1$ — усилитель.

Чувствительность ячейки Голея доходит до $5 \cdot 10^{-11}$ *вт*. Недостатком данного детектора является его большая тепловая инерционность. Так, постоянная времени ячейки составляет 0,02—0,1 *сек*.

В ряде экспериментов для обнаружения излучения также использовались термисторы, термопары (чувствительность до $4 \cdot 10^{-11}$ *вт*) и термостолбики.

Все индикаторные устройства субмиллиметрового диапазона весьма трудны в изготовлении и требуют периодической тщательной регулировки. Одним из возможных путей усиления субмиллиметровых волн является использование принципа молекулярных усилителей. Следует отметить, что в настоящее время имеются супергетеродинные приемники на $\lambda = 2—3$ *мм*, использующие гармоники клистрона.

21. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Одной из трудностей измерения мощности в субмиллиметровом диапазоне является очень малый ее уровень. Рассмотренные ранее способы индикации излучения могут быть также применены и для измерения мощ-

ности при наличии предварительной градуировки приборов.

Радиометр отличается широкополосностью из-за отсутствия избирательной чувствительности слюдяной пластинки к частоте излучения. Он может служить абсолютным измерителем мощности, так как мощность, па-

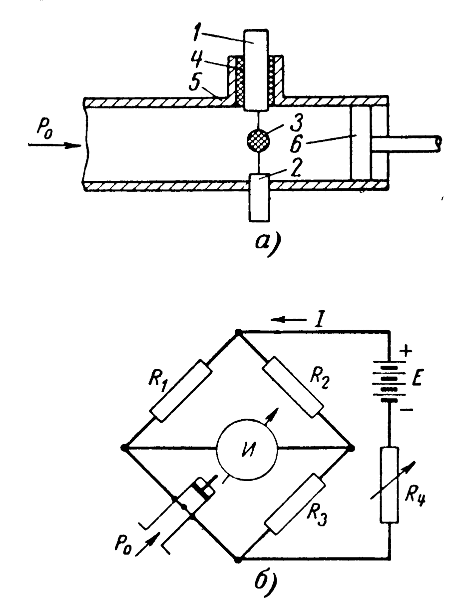


Рис. 20. Термисторный мост.

а — термисторная головка: *1*, *2* — выводы термистора; *3* — термистор; *4* — изолятор; *5* — волновод с высокочастотным сигналом P_0; *6* — подстроечный поршень; *б* — схема термисторного моста: *И* — гальванометр; P_0 — входной сигнал; R_1, R_2, R_3 — сопротивления плеч моста; R_4 — сопротивление для установки тока моста в отсутствие высокочастотного сигнала P_0.

дающая на пластинку, может быть рассчитана на основании известных данных: угла поворота пластины, упругости кварцевой нити и площади пластинки.

Для измерения мощностей порядка 1—100 *мквт* можно использовать термисторные мосты. Термистор представляет собой сопротивление, величина которого падает с ростом температуры. Термисторы, предназначенные для измерения высокочастотной мощности, конструктивно представляют собой (рис. 20,*а*) бусинку *3* из полу-

проводникового материала с выводами *1* и *2* из тонкой проволоки для уменьшения теплообмена. Для измерения высокочастотной мощности термистор устанавливается в волновод *5*, по которому проходит высокочастотная мощность P_0. Выводы термистора подключаются к мостовой схеме (рис. 20). В настоящее время термисторные мосты работают вплоть до $\lambda=2$ *мм*.

22. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ В СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Для измерения частоты электромагнитных колебаний в сантиметровом и миллиметровом диапазонах широко используются различного типа объемные резонансные волномеры. Однако они оказываются практически непригодными при приближении к длинам волн порядка 2 *мм* из-за очень малых геометрических размеров и жесткости допусков на их изготовление. В субмиллиметровом диапазоне волн имеет прямой смысл использовать оптические методы измерений. В настоящее время различные оптические методы опробованы как в миллиметровом, так и частично в субмиллиметровом диапазонах. К ним относятся интерферометры Майкельсона, Больцмана, Фабри—Перо и др., дифракционные спектрометры, различные фильтры и т. п. В субмиллиметровом диапазоне возможно создание компактных измерительных устройств, размеры которых будут много больше измеряемой длины волны, что является непременным условием нормальной работы оптических методов.

Работа интерферометров основана на явлении интерференции, т. е. на сложении колебаний. В данном случае складываются два колебания, имеющие разные фазы, что, в свою очередь, вызвано изменением разности хода колебаний в приборе. В результате сложения подобных колебаний при плавном изменении разности хода колебаний результирующее колебание будет проходить последовательно через максимальные и минимальные значения. Разности ходов, обеспечивающей прохождение соседних максимумов или минимумов, будет соответствовать значение, равное половине длины волны.

Схема интерферометра Майкельсона, используемого в миллиметровом диапазоне, приведена на рис. 21. Основными элементами интерферометра являются на-

клонная полупрозрачная пластина *5*, подвижное и неподвижное плоские зеркала (*3* и *4*), излучающий и приемный рупоры (*1* и *2*) и самописец *7*, связанный с подвижным зеркалом и через усилитель *6* с выходом приемного рупора. Излучение падает на полупрозрачную пластину, частично проходит через нее и частично от нее отражается. Далее колебания идут различными путями и, наконец, поступают в приемный рупор. При

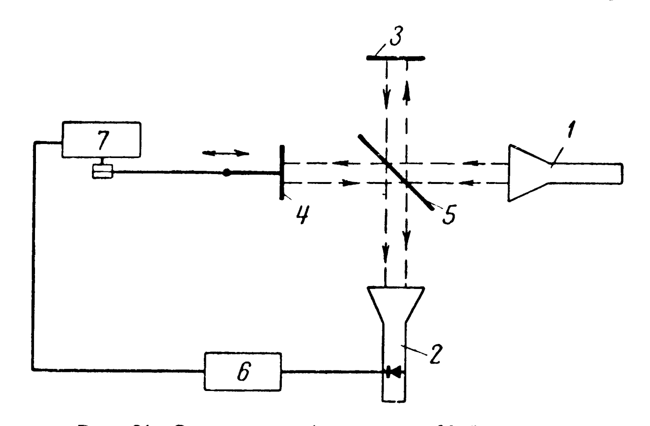


Рис. 21. Схема интерферометра Майкельсона.

1 — излучающий рупор; *2* — приемный рупор; *3* — неподвижное зеркало, *4* — подвижное зеркало; *5* — полупрозрачная пластина; *6* — усилитель; *7* — самописец.

смещении подвижного зеркала с помощью микрометрической головки получаем из-за изменения разности хода колебаний интерференционные максимумы и минимумы.

Интерферометр Больцмана (рис. 22) имеет два плоских зеркала — подвижное и неподвижное (*3* и *4*). Однако в этом случае они расположены рядом и параллельно друг другу. Излучающий и приемный рупоры (*1* и *2*) расположены также рядом. При передвижении подвижного зеркала благодаря интерференции будут наблюдаться максимумы и минимумы, регистрируемые с помощью самописца *6*. При регулировке зеркала устанавливаются таким образом, чтобы от них в приемный рупор поступали сигналы равной мощности.

Наибольшей разрешающей способностью обладает интерферометр Фабри—Перо (рис. 23). Он состоит из излучающего и приемного рупоров (*1* и *2*), между кото-

рыми помещаются две отражающие поверхности (*3* и *4*), набранные из нескольких слоев диэлектрических пластинок. Диэлектрические пластины имеют толщину $\lambda/4$ и разделены между собой воздушными промежутками та-

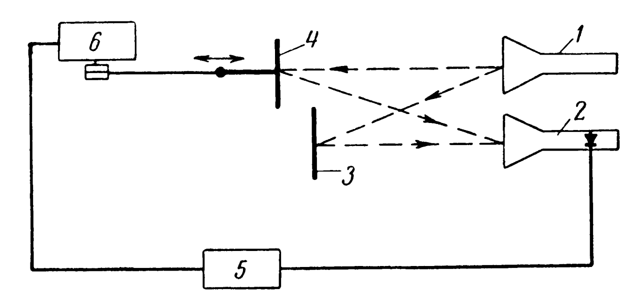


Рис. 22. Схема интерферометра Больцмана.

1 — излучающий рупор; *2* — приемный рупор; *3* — неподвижное зеркало, *4* — подвижное зеркало; *5* — усилитель; *6* — самописец.

кой же толщины. Подобная система многослойных пластин позволяет получить коэффициент отражения для поверхностей, близкий к единице. При изменении рас-

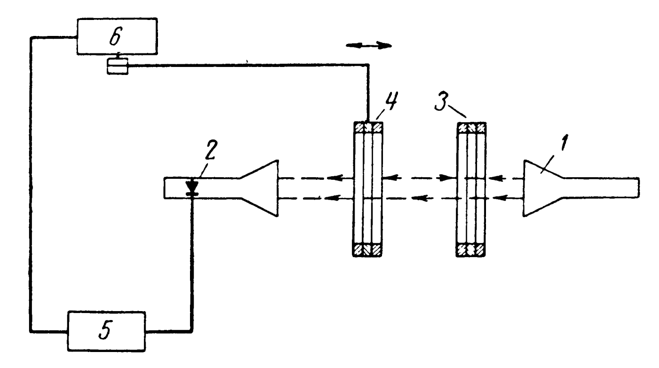


Рис. 23. Схема интерферометра Фабри — Перо.

1 — излучающий рупор; *2* — приемный рупор; *3* — неподвижная многослойная отражающая поверхность; *4* — подвижная многослойная отражающая поверхность; *5* — усилитель; *6* — самописец.

стояния между отражающими поверхностями вследствие многократной интерференции колебаний между ними регистрируются самописцем *6* очень резкие максимумы и минимумы. Добротность, соответствующая данной систе-

ме, доходит до нескольких десятков тысяч, что эквивалентно добротности хорошего объемного резонатора.

Измерения λ монохроматических излучений с помощью интерферометров могут выполняться с достаточно большой точностью, доходящей, например, в миллиметровом диапазоне до 0,01%. Погрешности измерения в основном связаны с неточностями изготовления прибора и влиянием внешних помех. Существенными недостатками являются: наличие значительных ослаблений

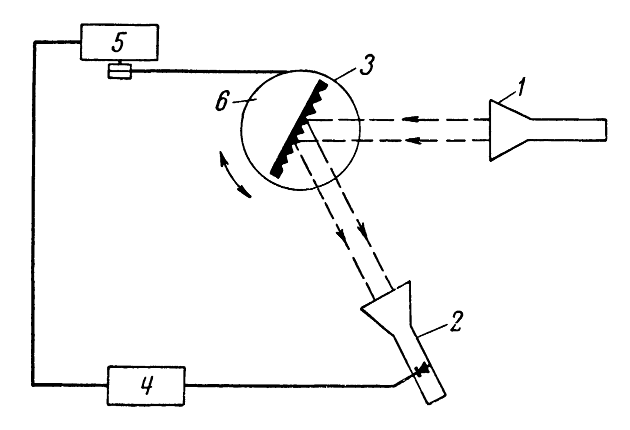


Рис. 24. Дифракционный спектрометр эшелеттного типа.

1 — излучающий рупор; *2* — приемный рупор; *3* — эшелетта; *4* — усилитель; *5* — самописец; *6* — поворотный столик.

измеряемого сигнала, доходящих до 30—40 *дб*, и сложность расшифровки картины при немонохроматическом источнике колебаний.

Представляют также большой интерес спектрометры, основанные на явлении дифракции. Схема дифракционного спектрометра эшелеттного типа приведена на рис. 24. Основным узлом спектрометра является отражающая ступенчатая дифракционная решетка или эшелетта *3*, в данном случае размещенная на поворотном столике *6*. Излучение, отраженное от эшелетты, регистрируется самописцем *5*, механически связанным с поворотным столиком. По полученному графику рассчитывается длина волны излучения. Точность измерения длины волны может быть порядка 0,01%.

Эшелеттные спектрометры обычно используются для измерения длин волн от 0,01 до 1,6 *мм*. Отечественный спектрометр ДИКС-1 работает в диапазоне от 0,02 до 0,5 *мм*.

Использование различных фильтров также позволяет оценивать длину волны электромагнитного излучения. Например, использование запредельных волноводов позволяет провести исследования спектра немонохроматического излучения в весьма широком диапазоне. Волноводы характеризуются критической длиной волны $\lambda_{кр}$. Для цилиндрических волноводов для волны H_{11}

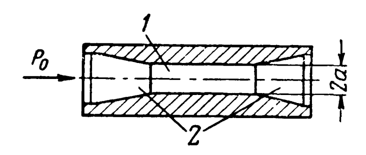


Рис. 25. Фильтр в виде запредельного волновода.

1 — цилиндрический запредельный волновод; *2* — плавные согласующие переходы; P_0 — исследуемый сигнал.

$$\lambda_{кр} = 3{,}41\,a,$$

где a — радиус волновода (рис. 25). При длине волны сигнала λ больше $\lambda_{кр}$ сигнал через волновод не проходит. При наличии волноводов с $\lambda_{кр n} < \lambda_{кр(n-1)} < \lambda_{кр(n-2)}$ будем иметь набор фильтров верхних частот. При широком спектре частот в излучении источника через n-й волновод пройдет спектр от $\lambda_{мин}$, определяемой параметрами генератора, до $\lambda_{кр n}$; через $(n-1)$-й волновод пройдет спектр частот от $\lambda_{мин}$ до $\lambda_{кр(n-1)}$ и т. д. Таким образом при переходе от n-го волновода к $(n-1)$-му величина мощности, поступающей на индикатор излучения, возрастет на величину мощности, заключенной в диапазоне от $\lambda_{кр n}$ до $\lambda_{кр(n-1)}$. Итак, при последовательном переключении волноводов будет наблюдаться ступенчатое изменение сигнала на индикаторе, по показаниям которого можно будет построить спектральное распределение мощности излучения.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

23. ПРИМЕНЕНИЕ В РАДИОТЕХНИКЕ

В настоящее время практически отсутствуют радиотехнические системы в субмиллиметровом диапазоне радиоволн. Поэтому о возможных путях его применения, а также о достоинствах и недостатках будущих систем

можно судить лишь предположительно, на основе аналогий и общих соображений, в длинноволновой области — с миллиметровыми радиотехническими устройствами, а в коротковолновой — с инфракрасными системами.

Очевидно, на субмиллиметровых волнах можно создавать очень узкие пучки электромагнитных волн при относительно малых размерах антенн. Использование субмиллиметровых волн позволяет в принципе улучшать системы радиовидения. Опыт работы за рубежом с 8-миллиметровыми радиолокаторами показывает, что при ширине луча 0,5°, получающемся в этом диапазоне, и длительности импульса 0,1 *мксек* на индикаторе локатора удавалось различать отдельно идущих людей. При этом само изображение на индикаторе напоминает реальный объект в отличие от сантиметровых локаторов, где облучаемая цель на экране видна лишь в виде электрического импульса. Радиовидение может широко использоваться в условиях плохой видимости на аэродромах, в портах, при наблюдении за движением автомашин на дорогах. На экране панорамного локатора (локатор кругового обзора) в этом случае наблюдается полная картина жизни данного объекта.

Радиолокационные станции субмиллиметрового диапазона могут быть также использованы для навигации на реках в условиях плохой видимости, для обнаружения проходов среди препятствий, например, льдин.

С точки зрения приближения изображения в системах радиовидения к оптическому изображению необходимо не только укорочение длины волны и увеличение размеров линзовых систем для создания узких пучков электромагнитных волн, но и применение немонохроматических источников излучения, например типа искровых генераторов. В этом случае вследствие различия коэффициентов отражения электромагнитных волн от объекта и разного поглощения на разных частотах, возможно получение изображения, более богатого полутонами и ближе соответствующего реальному, как это получается в инфракрасных локационных системах.

Существенным недостатком субмиллиметровых волн является их сильное поглощение в парах воды, содержащихся в атмосфере (рис. 14). Это сильно ограничивает дальность распространения электромагнитных колебаний, особенно если учесть сравнительно малую мощность

возможных источников субмиллиметрового излучения. Поэтому в наземных условиях подобные радиотехнические системы могут применяться только при работе на коротких расстояниях. Однако уменьшение затухания субмиллиметровых волн по мере удаления от поверхности земли и малые общие размеры радиотехнических устройств открывают большие возможности для их использования на спутниках Земли и, что особенно важно в связи с развитием космических полетов, для космических ракет.

24. ПРИМЕНЕНИЕ В ФИЗИКЕ, ХИМИИ И БИОЛОГИИ

Субмиллиметровые волны позволяют провести целый ряд важных исследований в области физики и химии. Уже в настоящее время осуществляется радиоспектроскопическое изучение веществ вплоть до волн с λ до 0,58 *мм*, получаемых с помощью кристаллических умножителей частоты. Схема подобных измерений приведена на рис. 26.

Исследуемое вещество *4* помещается на пути излучения, и определяется частота, на которой имеет место поглощение электромагнитной волны. Частота гармоники с большой точностью определяется с помощью прецизионного волномера *2* по частоте отражательного клистрона *1*.

В субмиллиметровом диапазоне расположены колебательные и вращательные спектры молекул ряда веществ. Поэтому измерениями можно значительно расширить наши сведения о строении молекул, об изотопах и т. д. Наиболее исследованы в настоящее время двух- и трехатомные молекулы, имеющие вращательные спектры поглощения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, например водорода, галоидов дейтерия, трития и др. Появляется возможность исследования с помощью радиоспектроскопии свойств радиоактивных изотопов, имеющихся в крайне малых количествах (менее 10^{-5} *г*). Так были изучены три радиоактивных изотопа иода.

Работы по созданию управляемой термоядерной реакции ставят необходимость контроля параметров плазмы. Поскольку плазма, находящаяся в высокочастотном электромагнитном поле, обладает комплексной диэлек-

трической постоянной, то для ее изучения можно пользоваться методами, разработанными для исследования диэлектриков. Последние основаны на измерениях изменения фазы и затухания электромагнитной волны. Из полученных данных можно определить плотность плазмы и судить о протекающих в ней процессах. Надежным и точным способом диагностики плазмы, позволяющим

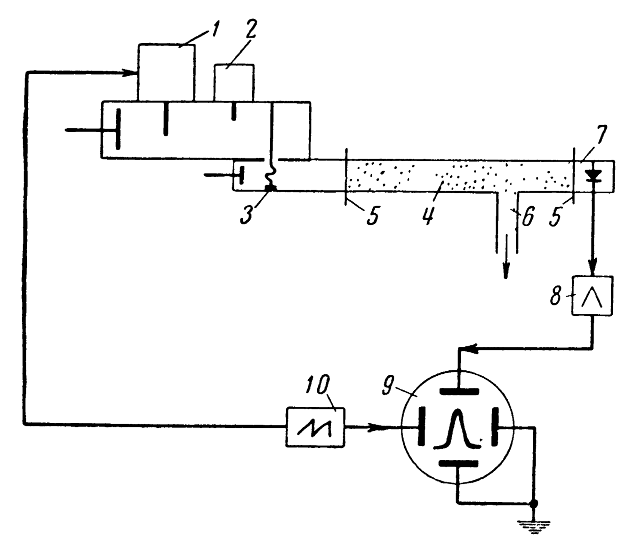


Рис. 26. Упрощенная схема радиоспектроскопа с кристаллическим умножителем частоты.

1 — отражательный клистрон; *2* — волномер; *3* — кристаллический умножитель частоты; *4* — поглощающая ячейка с исследуемым веществом — газом; *5* — вакуумно-плотные окошки, пропускающие электромагнитные колебания; *6* — входной патрубок; *7* — детектор; *8* — усилитель; *9* — осциллограф; *10* — генератор „пилообразного" напряжения развертки.

определить концентрацию зарядов в ней, является метод, основанный на измерении прохождения радиоволн (рис. 27). Выбор частоты сигнала определяется концентрацией плазмы. При этом требуются частоты сигнала, близкие к частоте плазмы, определяемой формулой, приведенной в § 12. При концентрациях плазмы порядка 10^{13}—10^{14} электронов в 1 *см*^{3} используют миллиметровые источники колебаний. Однако проведение работ, связанных с повышением концентрации до 10^{15} электро-

нов в 1 $см^3$ и выше требует создания источников субмиллиметрового диапазона.

Субмиллиметровые волны представляют также интерес для радиоастрономии. Несмотря на сильное поглощение в воздухе, можно получить ряд сведений о земной атмосфере, солнце и планетах. Интересными являются исследования с измерительной аппаратурой, помещенной на искусственных спутниках в верхние слои атмосферы.

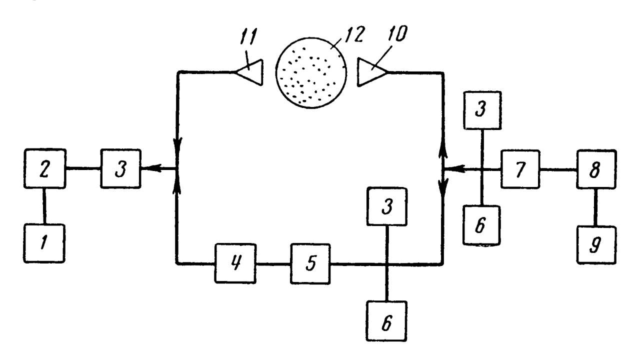


Рис. 27. Блок-схема измерений параметров плазмы при помощи волноводного моста.

1 — осциллограф; *2* — широкополосный усилитель; *3* — детектор; *4* — фазовращатель (0 — 180°); *5* — аттенюатор (0 — 40 *дб*); *6* — волномер; *7* — кристаллический умножитель частоты; *8* — отражательный клистрон; *9* — питание; *10* — излучающий рупор; *11* — приемный рупор; *12* — сосуд с плазмой.

Перспективными также считаются опыты по исследованию сверхпроводимости металлов. Помимо изучения явления сверхпроводимости и экспериментальной проверки теоретических положений, эти исследования смогут быть полезными для создания новых колебательных систем с малыми потерями в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Для химии также является существенным расширение знаний о строении молекул, полученных при изучении их спектров в субмиллиметровом диапазоне. Мыслится возможным создание аппаратуры, пригодной не только для проведения химических анализов, но и для непосредственного воздействия на ход химических реакций.

Для медицины представляет интерес исследование воздействия субмиллиметрового излучения на организм

человека и животных. При этом может проявляться как тепловое воздействие излучения, так и биологическое. Последнее способно привести к изменению в структуре белков, что может вредно сказаться на жизнедеятельности клеток.

Исследования влияния субмиллиметрового излучения на поведение микроорганизмов смогут способствовать изучению строения живой материи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освоение любого диапазона радиоволн в значительной степени определяется состоянием средств генерирования и приема. Миллиметровый диапазон, нашедший в настоящее время применение на практике, более или менее обеспечен генераторами и приемниками, которые быстро совершенствуются. Так, генераторные приборы типа магнетронов, отражательных клистронов и ламп с бегущей волной вплотную подходят к субмиллиметровому диапазону. Существуют кристаллические детекторы и измерители мощности почти во всем миллиметровом диапазоне. Усилительные лампы с бегущей волной приближаются к коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Несмотря на достигнутые успехи, в миллиметровом диапазоне по мере продвижения к субмиллиметровому диапазону возникают трудности принципиального характера. Если развитие миллиметровой техники в значительной степени определяется темпами освоения новых технологических приемов, дающих более высокую точность изготовления высокочастотных систем, при сохранении принципов работы приборов сантиметрового диапазона, то успешное развитие субмиллиметровой техники требует нахождения новых способов. Таким образом, становится необходимым проведение обширных теоретических и экспериментальных исследований как ранее известных физических принципов, так и, что наиболее существенно, новых путей генерирования, усиления и приема субмиллиметровых волн.

В настоящее время в качестве источника субмиллиметрового излучения наиболее часто применяется ртутная кварцевая лампа высокого давления, имеющая сплошной спектр излучения. Единственными источника-

ми маломощных когерентных колебаний (только в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона) являются кристаллические умножители частоты. Несколько лет тому назад возлагались большие надежды на получение мощных когерентных колебаний от умножителей частоты с пучками электронов, имеющих релятивистские скорости. Однако на этом пути встретились большие трудности при создании плотных электронных сгустков, соизмеримых с длиной волны генерируемых колебаний. Ометим, что при использовании протяженных излучающих систем существенным является разброс электронов по энергиям на выходе из ускорителей. Наличие электронов с различными скоростями приводит к быстрому расползанию электронных сгустков. Разброс электронов по энергиям для линейного ускорителя обычно составляет несколько процентов, а для микротрона — доли процента, что является достоинством последнего.

Несмотря на это, продолжается совершенствование ускорителей электронов и излучающих систем. Недавно с помощью ребатрона и черенковского излучателя, представляющего собой диэлектрический конус с каналом для пучка, была получена на 13-й гармонике ($\lambda = 8{,}3$ *мм*) импульсная мощность излучения в 0,3 *вт*. Представляют большой интерес работы по созданию умножителей частоты с отражением электромагнитных волн от движущегося электронного облака, а также с использованием свойств автоэлектронной эмиссии. Продолжается исследование систем с быстрыми волнами и электронными пучками, движущимися по сложным траекториям. В частности, в одном из предложенных приборов под названием торнадотрон электронное облако подвергается воздействию электрических и импульсных магнитных полей. С помощью этого прибора ожидается получение значительных мощностей в субмиллиметровом диапазоне. Высказывается идея ферромагнитного генератора, работа которого основывается на использовании прецессии спинов электронов в феррите, находящемся в магнитном поле.

Улучшение параметров полупроводниковых диодов с переменной емкостью позволяет продвинуть границу параметрических усилителей в миллиметровый диапазон. Развитие новых полупроводниковых приборов — туннельных диодов, основанных на использовании кванто-

механического туннельного эффекта и обладающих отрицательным сопротивлением, позволило создать генераторы в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Так, с туннельным диодом из арсенида галлия, по сообщению иностранной печати, была получена генерация на частоте 103 *Ггц* ($\lambda=2,9$ *мм*) с мощностью в несколько десятых микроватта, а на частоте 50 *Ггц* с мощностью в 25 *мквт*. Диод помещался в прямоугольный волновод с подвижным поршнем для перестройки по частоте. Следует отметить, что туннельные диоды питаются от источников постоянного тока и не требуют высокочастотной подкачки как параметрические усилители.

В настоящее время широко исследуются возможности генерации субмиллиметровых волн с помощью плазмы. В плазме, помещенной в магнитное поле, при наличии высокочастотного поля возможно появление циклотронного резонанса. Под воздействием полей возникают колебания плазмы, энергия которых может быть выведена из системы. Магнитное поле, требуемое для циклотронного резонанса электронов на частоте 300 *Ггц* ($\lambda=1$ *мм*) составляет 10,7 *кэ*. Создание таких полей связано с большими трудностями. Однако в настоящее время в лабораторных условиях получены кратковременные импульсные магнитные поля с напряженностью в несколько миллионов эрстед. Снижение магнитных полей возможно при использовании электронно-дырочной плазмы в полупроводниках. Возможны также другие способы возбуждения колебаний в плазме и полупроводниках, в частности, известна идея генерирования электромагнитной энергии акустическими волнами, возбуждаемыми в твердом теле при бомбардировке частицами.

Весьма перспективными для освоения субмиллиметрового диапазона являются молекулярные генераторы и усилители. Особенно велико значение появления подобных приборов в оптическом (л а з е р ы) и инфракрасном (и р а з е р ы) диапазонах. С помощью лазеров ожидается использование света как несущей частоты для направленной связи в космическом пространстве, увеличение точности спектроскопии в тысячу раз, управление химическими реакциями, оказание влияния давлением лучей света на орбиту спутников Земли и освещение с земли малых участков лунной поверхности. До-

стигнуты определенные успехи в создании измерительной аппаратуры для субмиллиметрового диапазона: разработан ряд индикаторов излучения и спектрографов, использующих оптические принципы.

При современном состоянии техники субмиллиметровых волн трудно предвидеть все возможные области ее применения. Освоение данного диапазона, возможно, приведет к осуществлению радиовидения, обеспечению многоканальной радиосвязи и связи в космическом пространстве, управлению химическими процессами, новым открытиям в физике, химии и биологии. Будущее покажет, какие применения окажутся наиболее важными и какие методы генерации и приема наиболее перспективными. Однако очевидно, что субмиллиметровый диапазон волн таит в себе огромные возможности, которые необходимо исследовать и использовать.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 14 коп.